

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού
Περιβάλλοντος**

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος

**« Μελέτη υλικών κάλυψης για εξοικονόμηση ενέργειας και αύξηση
της παραγωγής σε μεσογειακά θερμοκήπια »**

**Μεταπτυχιακή Διατριβή
Μερκούρης Οδυσσέας**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Κίττας
Βόλος 2014**

Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή

Κ. Κίττας (Επιβλέπων) Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Γεωργικές κατασκευές

Θ. Γέμτος Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Γεωργική Μηχανολογία

Θ. Μπαρτζάνας Ερευνητής Β Γεωργική Μηχανική
ΕΚΕΤΑ / ΙΕΤΕΘ

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τους καθηγητές μου Κατσούλα Νικόλαο και Κίττα Κωνσταντίνο, του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος που μου έδωσαν την δυνατότητα να ασχοληθώ με το παρών θέμα, αλλά και για την διαρκή επιστημονική και ηθική υποστήριξή τους κατά την διάρκεια της διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται και στα υπόλοιπα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, κ Θεοφάνη Γέμτο, Καθηγητή του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και Θωμά Μπαρτζάνα, Ερευνητή Β του Ινστιτούτου Έρευνας και Τεχνολογίας Θεσσαλίας (Ι.Ε.ΤΕ.Θ), για τις πολύτιμες υποδείξεις και επισημάνσεις που συνέβαλαν σημαντικά στην διαμόρφωση της παρούσας διατριβής.

Ακολούθως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα Ρηγάκη Νικόλαο για την άμεση βοήθειά του κατά την περίοδο διεξαγωγής των πειραμάτων, αλλά και για την αμέριστη επιστημονική του καθοδήγηση. Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα Φερεντίνο Κωνσταντίνο και τους υπόλοιπους υποψήφιους Διδάκτορες, Ελβανίδη Αγγελική και Τζούνη Αντώνη για τις πολύτιμες συμβουλές και το άριστο κλίμα συνεργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, καθώς και τους στενούς μου φίλους για την ηθική υποστήριξη, την υπομονή και κατανόηση που έδειξαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής.

Μερκούρης Οδυσσέας
Βόλος, Ιούλιος 2014

Στους γονείς μου

Περίληψη

Στην παρούσα διατριβή έγινε διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών υλικών κάλυψης στην εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση, στο μικροκλίμα, στην ανάπτυξη και στην παραγωγικότητα της καλλιέργειας της υδροπονικής τομάτας. Χρησιμοποιήθηκε ένα διπλό φύλλο πολυαιθυλενίου (Double), ένα φύλλο με μεγάλη ικανότητα διάχυσης του φωτός (Diffuse), και ένα απλό φύλλο πολυαιθυλενίου σαν μάρτυρας (Clear).

Βρέθηκε πως το Double είχε τον χαμηλότερο συντελεστή θερμικών απωλειών ($U=3,5 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$), το Diffuse είχε κατά μέσο όρο $U=5,5 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$, ενώ το Clear είχε $U=7 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$. Η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση ήταν χαμηλότερη κατά 40% στο Double και κατά 11% στο Diffuse σε σχέση με το Clear.

Όσον αφορά την φασματική περατότητα των υλικών κάλυψης, το Clear είχε την μεγαλύτερη περατότητα σε όλα τα φάσματα από 400-1100 nm, κατά 20-25% σε σχέση με το Diffuse και κατά 10-15 % σε σχέση με το Double. Το ποσοστό διάχυσης του φωτός ήταν 75%, 65%, και 35% για τα Diffuse, Double και Clear αντίστοιχα. Η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας και η μεγάλη ικανότητα της διάχυσης του φωτός, είχε θετική επίδραση στην απόδοση και στην δημιουργία ευνοϊκότερου μικροκλίματος στο θερμοκήπιο Diffuse, κατά την διάρκεια της εαρινής περιόδου. Αντιθέτως, κατά την χειμερινή καλλιεργητική περίοδο, η μείωση του εισερχόμενου φωτός λειτούργησε ανασταλτικά στην απόδοση της καλλιέργειας στο Diffuse. Το Clear, ενώ είχε την μεγαλύτερη απόδοση το χειμώνα, κατά την διάρκεια του καλοκαιριού οι ακραίες τιμές θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας οδήγησαν σε δραματική πτώση της απόδοσης. Το Double είχε χαμηλότερη απόδοση από το Clear το χειμώνα, αλλά υψηλότερη κατά την διάρκεια της εαρινής καλλιέργειας.

Abstract

The aim of this study was to investigate the effects of different greenhouse covering materials on the energy requirements, the greenhouse microclimate, the growth and the yield of a hydroponic tomato crop. A double inflated polyethylene film (Double), a polyethylene film with light diffusing properties (Diffuse) and a simple polyethylene film (Clear) were compared.

The Double had the lowest measured heat transfer coefficient ($U = 3.5 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$), the Diffuse an average of $U = 5.5 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$ and the Clear an average value of $U = 7 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$. The clear polyethylene was less energy - efficient by 40% and 11% in contrast with Double and Diffuse, respectively.

Light transmission of Diffuse was found to be the lowest while that of Clear was the highest. The average loss in light transmission was approximately 20-25% for Diffuse and 10-15% for Double. The Clear had the lowest light diffusing properties (35%), followed by Double (65%) and Diffuse (75%). During summer the microclimate under diffuse cover was more favorable, while the crop had the highest yield. On the other hand, during winter the diffusive properties didn't have positive effects on account of high loss of light transmittance. Tomato production under clear cover was the highest during winter and the lowest during summer, because of high temperature and solar radiation values. Total yield under the double cover was lower than Clear in the winter season but higher during summer.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	1
Σκοπός και δομή της εργασίας.....	2
1 Γενικά	3
1.1 Παγκόσμια εξάπλωση των θερμοκηπίων.....	3
1.2 Τα θερμοκήπια στην Ελλάδα	3
1.3 Προβλήματα των ελληνικών θερμοκηπίων.....	5
1.3.1 Το ενεργειακό πρόβλημα στα θερμοκήπια την χειμερινή περίοδο.....	5
1.3.2 Τα προβλήματα των θερμοκηπίων κατά την διάρκεια του θέρους.....	6
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	7
2.1 Ροή ενέργειας στο θερμοκήπιο	7
2.1.1 Τεχνικές μείωσης των ενεργειακών απωλειών στο θερμοκήπιο	8
2.1.2 Μεταφορά ενέργειας από το κάλυμμα του θερμοκηπίου	9
2.1.3 Επίδραση διαφορετικών υλικών κάλυψης στο κόστος θέρμανσης του θερμοκηπίου	11
2.2 Το μικροκλίμα του θερμοκηπίου	12
2.2.1 Θερμοκρασία	13
2.2.2 Υγρασία	15
2.2.3 Συμπύκνωση υδρατμών	16
2.3 Επίδραση διαφορετικών υλικών κάλυψης στο μικροκλίμα και την καλλιέργεια του θερμοκηπίου	17
2.4 Επίδραση της συμπύκνωσης των υδρατμών του καλύμματος στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και στην καλλιέργεια	20
2.5 Ακτινοβολία	21
2.5.1 Υπεριώδης ακτινοβολία (100-380nm).....	23
2.5.2 Ορατή ακτινοβολία (380-780nm).....	23
2.5.3 Υπέρυθρη ακτινοβολία	24
2.5.4 Άμεση και διάχυτη ακτινοβολία	25
2.5.5 Χαρακτηριστικά της διάχυσης του φωτός από το υλικό κάλυψης	26
3 Υλικά και Μέθοδοι.....	32
3.1 Εγκατάσταση του πειράματος.....	32

3.1.1	Τα θερμοκήπια	32
3.2	Εγκατάσταση της καλλιέργειας	34
3.2.1	Άρδευση-Λίπανση	35
3.2.2	Καλλιεργητικές τεχνικές.....	37
3.3	Μετρήσεις	38
3.3.1	Κλιματικές μετρήσεις	38
3.3.2	Μετρήσεις κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση.....	42
3.3.3	Υπολογισμός της ροής συμπύκνωσης των υδρατμών στο κάλυμμα	43
3.3.4	Ανάπτυξη και παραγωγή καλλιέργειας.....	44
3.3.5	Στατιστική ανάλυση.....	45
4	Αποτελέσματα	46
4.1	Αξιολόγηση μικροκλίματος	46
4.1.1	Θερμοκρασία	46
4.1.2	Σχετική υγρασία.....	53
4.1.3	Ηλιακή ακτινοβολία.....	59
4.1.4	Θερμοκρασία καλλιέργειας	65
4.1.5	Έλλειμμα κορεσμού του αέρα	71
4.2	Οπτικές ιδιότητες των καλυμμάτων.....	76
4.2.1	Φασματική περατότητα των θερμοκηπίων.	76
4.2.2	Καταμερισμός διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας στα θερμοκήπια.....	79
4.3	Αποτελέσματα ενεργειακής αξιολόγησης.....	82
4.3.1	Κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα θέρμανσης	82
4.3.2	Καθαρή ακτινοβολία.....	88
4.4	Δημιουργία συμπυκνώσεων στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος οροφής.....	91
4.4.1	Θερμοκρασία καλύμματος οροφής - Θερμοκρασία δρόσου	91
4.4.2	Απόλυτη υγρασία.....	95
4.4.3	Συμπύκνωση υδρατμών στο κάλυμμα οροφής	101
4.5	Αγρονομικές μετρήσεις (μη καταστροφικές).....	105
4.6	Αγρονομικές μετρήσεις (καταστροφικές).....	109
4.7	Απόδοση της καλλιέργειας.....	112
5	Συζήτηση και Συμπεράσματα.....	117

5.1	Κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση	117
5.2	Το μικροκλίμα σε σχέση με την καλλιέργεια.....	118
5.3	Οι οπτικές ιδιότητες των καλυμμάτων σε σχέση με την καλλιέργεια	120
5.4	Συμπύκνωση των υδρατμών στο κάλυμμα	121
5.5	Αγρονομικά στοιχεία και αποδόσεις	122
5.6	Συμπεράσματα	123
Βιβλιογραφία		126

Εισαγωγή

Τα θερμοκήπια ως τρόπος καλλιέργειας έχουν αναπτυχθεί ραγδαία τα τελευταία 30 χρόνια, λόγω των αυξημένων αναγκών για λαχανικά και καλλωπιστικά φυτά κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου. Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες δεν υπόκεινται σε ακραίες κλιματολογικές συνθήκες ενώ παράλληλα προστατεύονται ως ένα βαθμό από φυσικούς εχθρούς (έντομα, παράσιτα). Τα θερμοκήπια παρέχουν την δυνατότητα να δημιουργηθεί το κατάλληλο μικροκλίμα για οποιαδήποτε καλλιέργεια σε περιοχές με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών, νέων μεθόδων κλιματισμού καθώς και νέων υλικών κάλυψης κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών βοήθησε στην βελτιστοποίηση του μικροκλίματος του θερμοκηπίου με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής.

Η ορθολογική ρύθμιση του περιβάλλοντος μέσα στο θερμοκήπιο εξαρτάται από την δυνατότητα που έχει ο παραγωγός να συνδυάσει κατάλληλα τα εργαλεία και τις γνώσεις που έχει, με σκοπό να ελεγχθούν επαρκώς οι βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν το μικροκλίμα (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, CO₂). Παράλληλα με τον έλεγχο του μικροκλίματος η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί εξίσου σημαντικό παράγοντα για την επιβίωση μιας παραγωγικής μονάδας. Στις μεσογειακές χώρες έχει βρεθεί πως η ενέργεια που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου είναι 20-30% του συνολικού κόστους της παραγωγής (De Pascale και Maggio, 2004). Επειδή η θέρμανση χρησιμοποιείται πλέον και στα μεσογειακά θερμοκήπια με σκοπό την πρωίμιση της παραγωγής αλλά και την παραγωγή ανώτερων ποιοτικά προϊόντων, η αποδοτικότητα των θερμοκηπίων έχει αυξηθεί παράλληλα με το ενεργειακό κόστος του θερμοκηπίου. Το γεγονός αυτό έχει αρνητικό αντίκτυπο τόσο στο περιβάλλον όσο και στην βιωσιμότητα ενός θερμοκηπίου από την στιγμή που το ισοζύγιο κέρδος/κόστος μειώνεται λόγω της αύξησης των τιμών των καυσίμων.

Πέραν από την ενεργειακή εξοικονόμηση ένας παράγοντας ο οποίος λειτουργεί καταλυτικά στην αποδοτικότητα του θερμοκηπίου είναι η κατανομή και η ποιότητα του φωτός που χρησιμοποιεί η καλλιέργεια. Οι διαφορετικοί τύποι υλικών κάλυψης καθώς και ο συνδυασμός αυτών αποτελεί βασικό συστατικό στην δημιουργία ενός πιο αποδοτικού θερμοκηπίου.

Σκοπός και δομή της εργασίας

Στην παρούσα διατριβή γίνεται δοκιμή πλαστικών υλικών κάλυψης με διαφορετικές οπτικές και θερμικές ιδιότητες, με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση τους στην εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση, στη διάχυση του φωτός, στο μικροκλίμα και τέλος στην καλλιέργεια. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε ένα διπλό φουσκωτό κάλυμμα το οποίο έχει την ιδιότητα μόνωσης του θερμοκηπίου, ένα φύλλο με ιδιότητες διάχυσης του φωτός και ένα απλό φύλλο πολυαιθυλενίου σαν μάρτυρας.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μία εισαγωγή για την εξάπλωση των θερμοκηπίων παγκόσμια και στην Ελλάδα, καθώς και για τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι παραγωγοί όσον αφορά την ανάγκη για θέρμανση των θερμοκηπίων τον χειμώνα και για δροσισμό το καλοκαίρι.

Στο κεφάλαιο 2 της εργασίας γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των ερευνών προηγούμενων ετών σχετικά με την εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση των θερμοκηπίων την χειμερινή περίοδο και την επίδραση της διάχυσης της εισερχόμενης ακτινοβολίας τόσο στο μικροκλίμα όσο και στην συμπεριφορά των φυτών.

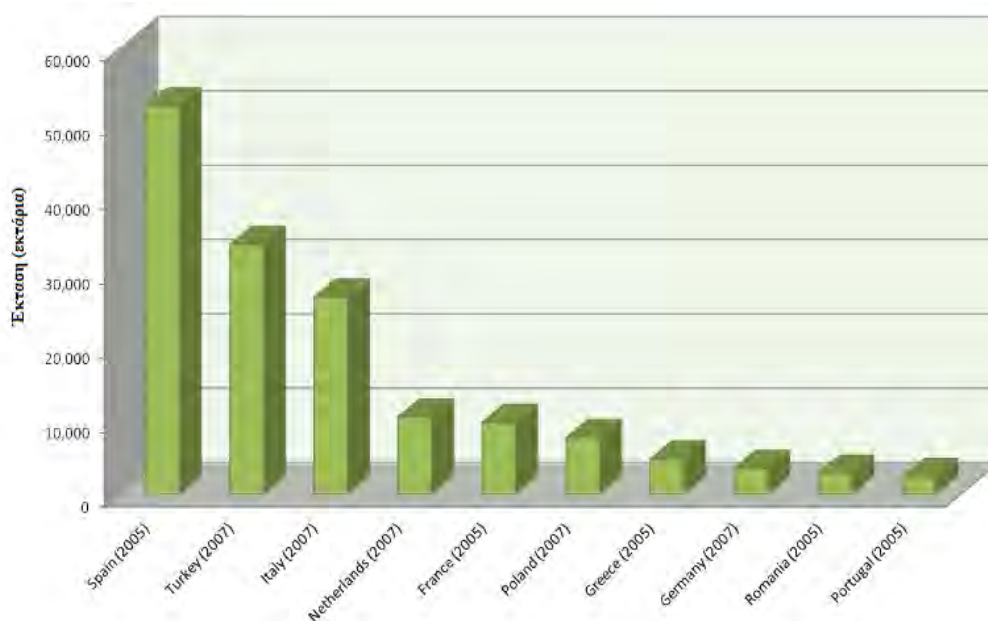
Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα υλικά και η μεθοδολογία του πειράματος.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων που έγιναν κατά την διάρκεια του πειράματος και στο κεφάλαιο 5 αναλύονται και συζητούνται οι οπτικές ιδιότητες των καλυμμάτων, η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, το μικροκλίμα του θερμοκηπίου, η ανάπτυξη και η παραγωγή της καλλιέργειας για κάθε μεταχείριση.

1 Γενικά

1.1 Παγκόσμια εξάπλωση των θερμοκηπίων

Η έκταση των θερμοκηπίων παγκοσμίως υπολογίζεται σε 3.200.000 στρέμματα για το 2011. Σε αυτή την έκταση δεν συμπεριλαμβάνεται η Κίνα η οποία κατέχει περίπου 27.600.000 στρέμματα τα οποία αποτελούν απλές πλαστικές κατασκευές και χαμηλά πλαστικά σκέπαστρα. Όσον αφορά την Ευρώπη η συνολική έκταση των θερμοκηπίων ανέρχεται σε 2.400.000 στρέμματα εκ των οποίων τα περισσότερα κατέχει η Ισπανία (52.170 ha), η Τουρκία (33.515 ha), η Ιταλία (26.500 ha) και η Ολλανδία (10.370 ha). Η Ελλάδα βρίσκεται στην 7^η θέση με 5.670 ha συνολική έκταση, η οποία είναι αναλογικά πολύ μικρότερη σε σχέση με χώρες όπως η Ιταλία και η Ισπανία όπου επικρατούν παρόμοιες κλιματολογικές συνθήκες.

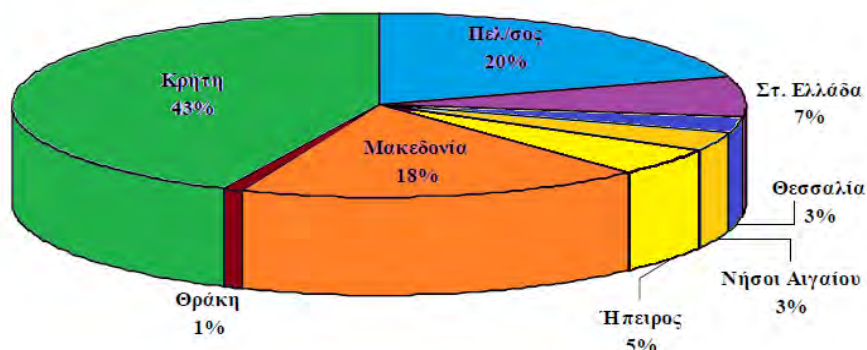


Σχήμα 1. Η έκταση των θερμοκηπίων στην Ευρώπη (Kacira, 2011)

1.2 Τα θερμοκήπια στην Ελλάδα

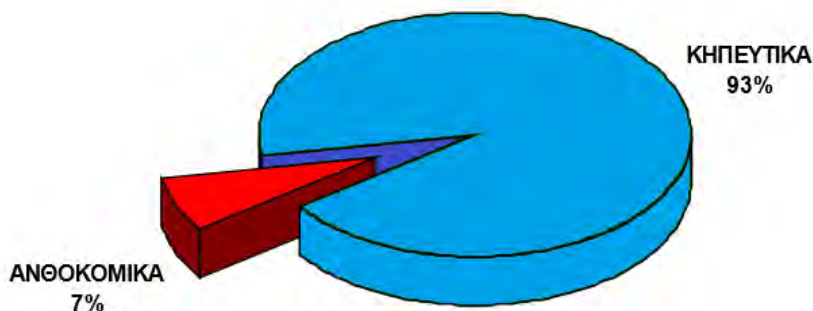
Στην Ελλάδα η καλλιέργεια σε θερμοκήπια ξεκίνησε την δεκαετία του 50 ενώ αναπτύχθηκαν ραγδαία μετά την δεκαετία του 60 λόγω της ευρείας χρήσης του πολυαιθυλενίου σαν υλικό κάλυψης. Ο μεγαλύτερος όγκος των θερμοκηπίων συγκεντρώνεται σε περιοχές όπως η Κρήτη και η Πελοπόννησος όπου δεν επικρατούν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και υπάρχει έντονη ηλιακή ακτινοβολία κατά την διάρκεια του έτους. Οι θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις αυξάνονται τα

τελευταία χρόνια και από παραγωγούς που βρίσκονται σε Βορειότερα σημεία της χώρας όπως η Θεσσαλία και η Μακεδονία.



Σχήμα 2. Γεωγραφική κατανομή των Ελληνικών θερμοκηπίων το 1999 (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων)

Οι κύριες καλλιέργειες των θερμοκηπίων στην Ελλάδα είναι η τομάτα και το αγγούρι όπου καταλαμβάνουν το 70% του συνόλου των θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Το υπόλοιπο 23% ανήκει σε καλλιέργειες άλλων κηπευτικών και μόνο το 7% αντιστοιχεί σε ανθοκομικές καλλιέργειες (τριαντάφυλλα, γαρύφαλλα, γλαστρικά φυτά).



Σχήμα 3. Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες των Ελληνικών θερμοκηπίων το 2006 (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων).

Η μέση στρεμματική απόδοση της τομάτας σε μια υπαίθρια καλλιέργεια είναι η μισή σε σχέση με μία θερμοκηπιακή καλλιέργεια. Σε γενικές γραμμές στην Ελλάδα η απόδοση είναι 10 τόνοι/στρέμμα για την τομάτα για μία συμβατική καλλιέργεια ενώ με την χρήση της υδροπονίας η απόδοση μπορεί να φτάσει τους 20 ή 30 τόνους/στρέμμα. Εάν παράλληλα με την υδροπονία γίνει χρήση όλων των νέων

τεχνικών και τεχνολογιών με σκοπό την βελτιστοποίηση του μικροκλίματος για τα φυτά, τότε η αποδόσεις μπορούν να ξεπεράσουν και τους 40 τόνους/στρέμμα. Συνεπώς λόγω της μικρής στρεμματικής έκτασης που κατέχει η Ελλάδα θα πρέπει να αυξηθεί η ποσότητα του παραγόμενου προϊόντος ανά μονάδα επιφάνειας με στόχο την ανταγωνιστικότητα των Ελληνικών προϊόντων.

1.3 Προβλήματα των ελληνικών θερμοκηπίων

Η έρευνα πάνω στην τεχνολογία των θερμοκηπίων έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών με σκοπό την διατήρηση του βέλτιστου μικροκλίματος για τα φυτά, με σκοπό την μέγιστη απόδοση με όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος. Αυτό το κόστος συμπεριλαμβάνει την αρχική επένδυση, το ενεργειακό κόστος, καθώς και τα εργατικά μεροκάματα. Το κύριο πρόβλημα των Ελληνικών θερμοκηπίων είναι η αδυναμία συντήρησης του ιδανικού μικροκλίματος για την ανάπτυξη των φυτών, είτε λόγω έλλειψης τεχνογνωσίας και σωστής οργάνωσης από τους παραγωγούς είτε λόγω χαμηλής ποιότητας της κατασκευής και του εξοπλισμού του θερμοκηπίου. Το κόστος των καυσίμων κυρίως για την θέρμανση του θερμοκηπίου αποτελεί επίσης ανασταλτικό παράγοντα στην δημιουργία ανταγωνιστικών προϊόντων στην αγορά. Εξαιτίας όλων των παραπάνω η μέση στρεμματική απόδοση στην Ελλάδα είναι αρκετά χαμηλότερη σε σχέση με άλλες χώρες όπως η Ισπανία και η Ολλανδία όπου έχουν πετύχει στρεμματικές αποδόσεις άνω των 60 τόνων/στρέμμα.

1.3.1 Το ενεργειακό πρόβλημα στα θερμοκήπια την χειμερινή περίοδο

Λόγω του υψηλού κόστους των καυσίμων για την θέρμανση του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια του χειμώνα, αρκετοί Έλληνες παραγωγοί έχουν επιλέξει είτε να μην θερμαίνουν καθόλου, είτε να αλλάζουν την καλλιέργεια τους, είτε να μην καλλιεργούν την χειμερινή περίοδο. Περισσότερα από τα μισά θερμοκήπια στην Ελλάδα δεν έχουν κανένα σύστημα θέρμανσης ενώ από αυτά που θερμαίνονται μόνο τα μισά έχουν την δυνατότητα να συντηρήσουν ικανοποιητικά το μικροκλίμα σε όλη την διάρκεια του χρόνου. Το πρόβλημα των χαμηλών θερμοκρασιών το χειμώνα μπορεί να λυθεί με την χρήση εξοπλισμού θέρμανσης υιοθετώντας όμως νέες τεχνικές που θα βελτιώνουν την ενεργειακή συμπεριφορά των θερμοκηπίων. Η πρόκληση λοιπόν τόσο για τους ερευνητές όσο και για τους παραγωγούς είναι η

ανακάλυψη νέων τεχνικών που θα συνδυάζουν την μέγιστη ενεργειακή απόδοση ενός θερμοκηπίου με παράλληλη εξοικονόμηση ενέργειας. Ο σωστός σχεδιασμός της κατασκευής, τα πιο αποδοτικά συστήματα θέρμανσης, τα νέα υλικά κάλυψης, οι νέες τεχνολογίες, καθώς και η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορούν να οδηγήσουν στην δημιουργία ενεργειακά αποδοτικών θερμοκηπίων.

1.3.2 Τα προβλήματα των θερμοκηπίων κατά την διάρκεια του θέρους

Κατά την διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού το σημαντικότερο πρόβλημα που εμφανίζεται στα Ελληνικά θερμοκήπια αλλά και γενικότερα στην Μεσόγειο, είναι οι υψηλές θερμοκρασίες καθώς και η υψηλή ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Συνέπεια αυτών των παραγόντων είναι η έντονη θερμική και υδατική καταπόνηση των φυτών με αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης της καλλιέργειας. Η υψηλή ένταση ακτινοβολίας σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία παρεμποδίζει τις βιολογικές δραστηριότητες των φυτών και σε ακραίες τιμές προκαλεί εγκαύματα σε φύλλα άνθη και βλαστούς αναστέλλοντας πλήρως την λειτουργία τους. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την χρήση φυσικού και δυναμικού αερισμού, με ψύξη του χώρου (υγρή παρειά, fog system) και με σκίαση των φυτών (κουρτίνα, εξωτερικά σκίαστρα, ασβέστωμα, υλικά κάλυψης με ικανότητα διάχυσης του φωτός). Η εφαρμογή μιας ή και περισσότερων από τις παραπάνω τεχνικές δροσισμού του θερμοκηπίου αποσκοπεί στην δημιουργία ήπιου κλίματος για τα φυτά κατά την διάρκεια της θερινής περιόδου δίνοντας την δυνατότητα στον παραγωγό να καλλιεργεί όλο το χρόνο αυξάνοντας την αποδοτικότητα του θερμοκηπίου.

2.1.1 Τεχνικές μείωσης των ενεργειακών απωλειών στο θερμοκήπιο

Τα τελευταία χρόνια αρκετές επιστημονικές έρευνες έχουν στοχεύσει στην ανακάλυψη νέων τεχνολογιών με τις οποίες θα μπορούσε να βελτιωθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα των θερμοκηπίων ενώ παράλληλα θα μειώνονταν η κατανάλωση καυσίμων, συνεπώς και η επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τις εκπομπές ρύπων. Αυτές οι νέες τεχνολογίες θα πρέπει να στοχεύουν στην μείωση των ενεργειακών απωλειών που συμβαίνουν στο θερμοκήπιο. Οι De Pascale και Maggio (2004) έχουν κινηθεί προς αυτήν την κατεύθυνση και έχουν θέσει σαν αντικειμενικό στόχο την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών, με παράλληλη αύξηση της ακτινοβολίας στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου με φυσικές και τεχνητές μεθόδους. Οι ενεργειακές απώλειες που συμβαίνουν στο περιβάλλον του θερμοκηπίου είναι οι παρακάτω:

- Μεταφορά θερμότητας με αγωγή προς το έδαφος.
- Μεταφορά θερμότητας λόγω διαφυγών.
- Μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας (αερισμός, συμπύκνωση)
- Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία από το κάλυμμα.

Η προσπάθεια λοιπόν για την δημιουργία ενός ενεργειακά αποδοτικού θερμοκηπίου μπορεί να γίνει βελτιώνοντας μια ή περισσότερες από τις παραπάνω παραμέτρους. Για παράδειγμα, η καλύτερη κατασκευή ενός θερμοκηπίου θα μπορούσε να μειώσει τις απώλειες λόγω διαφυγών ενώ η εφαρμογή θέρμανσης στο υπέδαφος του θερμοκηπίου θα μείωνε τις απώλειες θερμότητας με αγωγή προς το υπέδαφος (Kupraska και Slipek, 2000). Επίσης, έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία από το κάλυμμα βελτιώνοντας την μόνωση του θερμοκηπίου. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να γίνει με τη χρήση διπλού υλικού κάλυψης (Garzoli και Blackwell, 1987; Seginer et al., 1988; Abak et al., 1994; Zhang et al., 1996; Gupta και Chandra, 2002; Cemek et al., 2006), με την εφαρμογή διαφόρων τύπων υλικών κάλυψης (γυαλί, PE, PVC, UV, IR), με συνδυασμούς αυτών (Seginer et al., 1988; Zhang et al., 1996; Papadopoulos et al., 1997; Papadakis et al., 2000; Cemek et al., 2006; Al-Mahdouri et al., 2013), καθώς και με την χρήση θερμοκουρτίνας (Chandra και Albright, 1980; Glosal και Tiwari, 2004; Kittas et al., 2003; Dieleman και Kempkes, 2006). Τέλος η βελτίωση του εξοπλισμού και η εφαρμογή νέων μεθόδων θέρμανσης θα οδηγούσε σε λιγότερο

ενεργοβόρα θερμοκήπια (Bartzanas et al., 2005; Teitel et al., 1998; Chou et al., 2004; Κανγά, 2010)

2.1.2 Μεταφορά ενέργειας από το κάλυμμα του θερμοκηπίου

Τα υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων, λόγω του μικρού πάχους έχουν μικρή μονωτική ικανότητα με αποτέλεσμα όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλή, η ροή θερμότητας από το εσωτερικό του θερμοκηπίου προς τα έξω να είναι μεγάλη. Οι απώλειες θερμότητας από το κάλυμμα με συναγωγή και αγωγή περιγράφονται από τον παρακάτω τύπο:

$$Q = U A_c (T_{in} - T_{out}) \text{ (W)}$$

A_c η επιφάνεια του καλύμματος (m^2)

T_{in} η θερμοκρασία μέσα στο θερμοκήπιο ($^{\circ}C$)

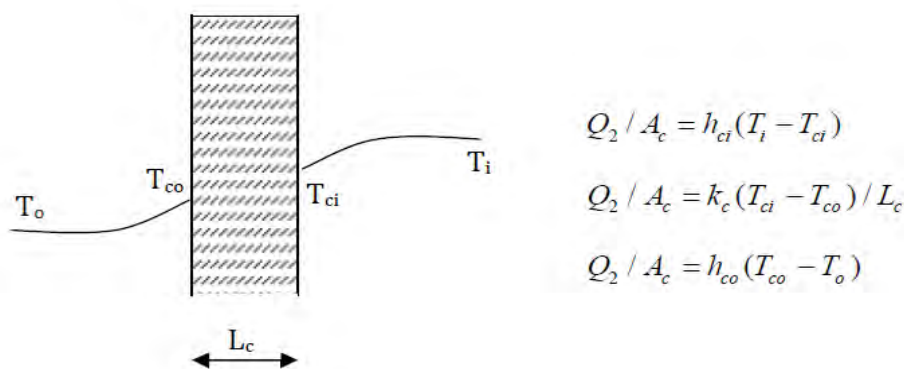
T_{out} η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ($^{\circ}C$)

U ο συντελεστής απωλειών θερμότητας του καλύμματος ($W m^{-2} ^{\circ}C^{-1}$)

Πιο συγκεκριμένα οι απώλειες θερμότητας από το κάλυμμα οφείλονται σε τρεις επιμέρους αντιστάσεις:

1. h_{ci} συντελεστής συναγωγής του εσωτερικού αέρα προς το κάλυμμα.
2. k_c συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του καλύμματος.
3. h_{co} συντελεστής συναγωγής του εξωτερικού αέρα προς το κάλυμμα.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι σχέσεις των επιμέρους αντιστάσεων.

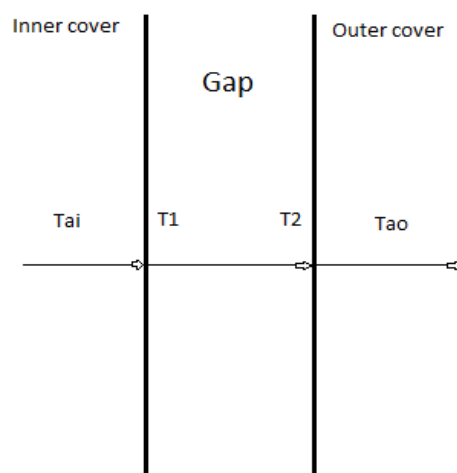


Στην περίπτωση του μονού γυάλινου καλύμματος ο συντελεστής αγωγής αποτελεί συνήθως αμελητέα ποσότητα, που σημαίνει πως η εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία της επιφάνειας του καλύμματος ταυτίζονται (Καυγά, 2010).

Το απλό γυαλί και το μονό πλαστικό έχουν υψηλό συντελεστή θερμικών απωλειών, της τάξης του $6,2 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (ASAE Standards, 2003), με αποτέλεσμα να απαιτείται πολύ μεγάλη εισροή ενέργειας έτσι ώστε να μπορεί να διατηρηθεί η κατάλληλη θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Μια κοινή μέθοδος αύξησης της θερμικής αντίστασης ενός υλικού κάλυψης είναι η προσθήκη ενός δεύτερου στρώματος σε απόσταση συνήθως 10 cm από το πρώτο. έτσι ώστε η θερμότητα να μεταφέρεται δυσκολότερα διαμέσου του κενού των δύο στρωμάτων. Η εγκατάσταση ενός δεύτερου πλαστικού καλύμματος χρησιμοποιείται με σκοπό την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών υπό την προϋπόθεση ότι το ποσοστό μείωσης στην διαπερατότητα του φωτός είναι αποδεκτό (Garzoli και Blackwell, 1987)

Στην περίπτωση που έχουμε διπλό φουσκωτό πλαστικό κάλυμμα η ροή θερμότητας με συναγωγή και αγωγή από το εσωτερικό του θερμοκηπίου προς τα έξω περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις.

- $H_{ci} = h_{ci} * A_c(T_{ai} - T_1)$
- $H_{cgap} = h_{cgap} * A_c(T_1 - T_2)$
- $H_{co} = h_{co} * A_c(T_2 - T_{ao})$



H_c : μεταφορά ενέργειας (W)

h_c : συντελεστής μεταφοράς ενέργειας ($\text{W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

A_c : επιφάνεια του καλύμματος (m^2)

T : θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)

Πιο συγκεκριμένα οι παραπάνω σχέσεις εκφράζουν την ροή ενέργειας με συναγωγή από το εσωτερικό του θερμοκηπίου προς το εσωτερικό κάλυμμα (H_{ci}), από το εσωτερικό κάλυμμα προς το εξωτερικό διαμέσου του κενού μεταξύ των δύο φύλλων (H_{cgap}) και από το εξωτερικό κάλυμμα προς τα έξω (H_{co}).

2.1.3 Επίδραση διαφορετικών υλικών κάλυψης στο κόστος θέρμανσης του θερμοκηπίου

Αρκετοί ερευνητές μελέτησαν διάφορα υλικά κάλυψης θερμοκηπίων με σκοπό την μείωση του ενεργειακού κόστους τους χειμερινούς μήνες. Κάποια από αυτά τα υλικά ήταν πλαστικά καλύμματα με θερμικές ιδιότητες (Infra-Red), διπλά πλαστικά (d-poly), γυαλί, και Plexiglas. Παράλληλα μελετήθηκε και η χρήση της θερμοκουρτίνας στα θερμοκήπια.

Εξαιτίας του υψηλού κόστους για την θέρμανση του θερμοκηπίου χρησιμοποιούνται υλικά κάλυψης που απορροφούν την υπέρυθη ακτινοβολία, διπλό πλαστικό ή γυαλί καθώς και θερμοκουρτίνες με στόχο να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας. Διάφοροι ερευνητές διαπίστωσαν σημαντικό ενεργειακό κέρδος από την χρήση αυτών των τεχνικών (O' Flaherty και Maher 1978, 1980; Weimann, 1989; Ferare και Goldsberry, 1984; Magnani, 1987; Lagier, 1991). Ωστόσο, παρατηρήθηκε μείωση της διαπερατότητας του φωτός κατά 10 με 30%, αύξηση της υγρασίας (Nisen και Coutisse, 1981) καθώς και χαμηλότερη απόδοση και ποιότητα στην παραγωγή (Steinbuch και de Vooren, 1984)

Οι Cemek et al., (2006) βρήκαν πώς στην ανάλυση του κόστους/κέρδους, η καλλιέργεια της μελιτζάνας στο θερμοκήπιο ήταν οικονομικά βιώσιμη σε θερμοκήπια που είχαν διπλό πλαστικό, Infra-red πλαστικό και UV πλαστικό αλλά όχι στο θερμοκήπιο με το μονό πλαστικό κάλυμμα. Ο λόγος κόστος/κέρδος για τις μεταχειρίσεις d-poly, IR+PE και UV+PE ήταν 0.55, 0.74 και 0.77 αντίστοιχα. Οι Tiwari και Sharma (1999) βρήκαν παρόμοια αποτελέσματα για το αγγούρι.

Οι Gupta και Chandra (2002) πρότειναν το διπλό τζάμι για την μείωση του ενεργειακού κόστους κατά 23% στα θερμοκήπια γοτθικού τύπου.

Οι Zhang et al., (1996) βρήκαν πως κατά την διάρκεια της μέρας το θερμοκήπιο με την γυάλινη οροφή ήταν πιο ενεργοβόρο κατά 44% με 48% σε σχέση με το διπλό πλαστικό anti-fog ή το διπλό πλαστικό με το κάτω φύλλο θερμικό (IR). Την νύχτα όταν μπήκε θερμοκουρτίνα μόνο μαζί με το γυαλί, 24-40% περισσότερη ενέργεια καταναλώθηκε στο θερμοκήπιο με το διπλό πλαστικό anti-fog και 7-28% στο διπλό πλαστικό με το θερμικό εσωτερικό φύλλο. Όταν χρησιμοποιήθηκε θερμοκουρτίνα σε όλες τις μεταχειρίσεις, τα διπλά πλαστικά anti-fog σπατάλησαν λιγότερη ενέργεια κατά 10% περίπου ενώ το διπλό πλαστικό με το θερμικό φύλλο 10-15%. Επίσης απέδειξαν πώς η εξοικονόμηση ενέργειας από την χρήση

θερμοκουρτίνας σε θερμοκήπιο με διπλό πλαστικό κάλυμμα είναι χαμηλότερη απ' ό,τι όταν συνδυάζεται με άλλα υλικά κάλυψης. Η μέση τιμή του U (συντελεστής απωλειών θερμότητας) για τα διπλά πλαστικά φύλλα κυμαίνονταν από 2,9 με 3,4 $W/m^2/K$ ενώ σημειώνουν πώς η ταχύτητα του ανέμου καθώς και ο καθαρός ή νεφοσκεπής ουρανός επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή απωλειών θερμότητας. Με καθαρό ουρανό οι απώλειες θερμότητας είναι πάντα υψηλότερες σε σχέση με συννεφιασμένο ουρανό.

Οι Garzoli και Blackwell (1987) υπολόγισαν τις απώλειες θερμότητας μεταξύ ενός απλού φύλλου κάλυψης και ενός διπλού κάτω από τις ίδιες κλιματικές συνθήκες και βρήκαν πως στο θερμοκήπιο με την διπλή επένδυση, η εξοικονόμηση ενέργειας ήταν μεταξύ 19% και 40% με ένα μέσο όρο 32% πάντα σε σχέση με την εξωτερική θερμοκρασία και την ταχύτητα του ανέμου. Επίσης οι Mulder και de Vries (1979) βρήκαν πως μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας 30% με 35% αλλά και ο Hesse (1980) ο οποίος ανέφερε εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 40%.

Οι Papadopoulos και Hao (1997) όσον αφορά το κομμάτι της ενέργειας, βρήκαν πως θερμοκήπια με διπλό πλαστικό και ακρυλικό κάλυμμα κατανάλωναν 30% λιγότερη ενέργεια για θέρμανση σε σχέση με ένα απλό γυάλινο.

Γενικότερα η άποψη να χρησιμοποιηθούν ενεργειακά αποδοτικότερα υλικά κάλυψης, βασίζεται όχι μόνο στην ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας και καυσίμων αλλά και στην συνολική επίδραση που έχουν αυτά τα υλικά στο περιβάλλον του θερμοκηπίου και κατά συνέπεια στην καλλιέργεια (Papadopoulos και Hao, 1997).

2.2 Το μικροκλίμα του θερμοκηπίου

Το μικροκλίμα του θερμοκηπίου καθορίζεται από τον συνδυασμό διαφόρων φυσικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η υγρασία, το διοξείδιο του άνθρακα και η διαπνοή των φυτών και μεταβάλλεται σύμφωνα με τις ανταλλαγές ενέργειας και μάζας που συμβαίνουν μέσα και έξω από αυτό. Το μικροκλίμα επηρεάζεται επίσης από την τοποθεσία, τον τύπο και την πυκνότητα της καλλιέργειας, τον όγκο, το σχήμα, το υλικό κατασκευής και κάλυψης του θερμοκηπίου. Ακόμα εξαρτάται από τον τύπο των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης (αερόθερμα, σωλήνες θέρμανσης, υπέρυθρη ακτινοβολία, παθητική θέρμανση κτλ.)

Η είσοδος νέων τεχνολογιών με σκοπό την βελτιστοποίηση του μικροκλίματος του θερμοκηπίου οδήγησε σε μία αρκετά πολύπλοκη διαδικασία, την

άρτια διαχείριση του. Για παράδειγμα η μείωση του κόστους θέρμανσης με την εφαρμογή νέων τεχνικών (διπλό πλαστικό) μείωνε την διαπερατότητα του φωτός ενώ οδηγούσε και σε αύξηση της υγρασίας. Εξαιτίας λοιπόν των πολύπλοκων και συνεχών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των κλιματικών παραγόντων και του θερμοκηπίου, κρίνεται αναγκαίο να μελετηθεί η επίδραση μιας νέας τεχνικής ή ενός νέου υλικού στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου σε διαφορετικές περιόδους με διάφορες καλλιέργειες και σε διαφορετικούς τόπους. Παράλληλα με τις πειραματικές μεθόδους διάφοροι ερευνητές έχουν αναπτύξει μεθόδους προσομοίωσης με σκοπό να προβλέψουν τις παραμέτρους στο μικροκλίμα ενός θερμοκηπίου. Τα μοντέλα προσομοίωσης είναι φυσικά μοντέλα που περιγράφουν την εξέλιξη διαφόρων περιβαλλοντικών παραμέτρων του θερμοκηπίου συνυπολογίζοντας την δομή του, τις ιδιότητες του καλύμματος, τις φυσιολογικές διεργασίες της καλλιέργειας και τις κλιματολογικές συνθήκες. Τέτοια μοντέλα προσομοίωσης είναι ικανά να βελτιστοποιήσουν τον σχεδιασμό ενός θερμοκηπίου και την διαχείριση του μικροκλίματος. Η έρευνα πάνω στην διαδικασία της προσομοίωσης για τον έλεγχο του μικροκλίματος και το ενεργειακό ισοζύγιο άρχισε την δεκαετία του 80 (Bot 1983).

2.2.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία ίσως αποτελεί την σημαντικότερη παράμετρο στην αύξηση και ανάπτυξη των φυτών δεδομένου ότι καθορίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τις βασικές φυσιολογικές διεργασίες των φυτών όπως η φωτοσύνθεση η αναπνοή και η διαπνοή οι οποίες με την σειρά τους ρυθμίζουν την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών. Η φωτοσύνθεση αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας μέχρι ένα όριο όταν όλοι οι άλλοι παράμετροι όπως το φως, το νερό, η θρέψη και το διοξείδιο του άνθρακα είναι επαρκή. Πέραν από ένα όριο η φωτοσύνθεση παύει να αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και αρχίζει να μειώνεται λόγω φωτοαναπνοής αλλά και βλαβών που προκαλούν στα κύτταρα οι υψηλές θερμοκρασίες. Σε εύκρατες περιοχές η φωτοσύνθεση αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι μια μέγιστη τιμή που κυμαίνεται μεταξύ 15 και 25 °C ανάλογα με την καλλιέργεια.

Η αναπνοή αποτελεί μια σειρά βιοχημικών αντιδράσεων με τις οποίες το φυτό αξιοποιεί τα σάκχαρα που αποθηκεύτηκαν με την φωτοσύνθεση για την συντήρηση του φυτού και για την σύνθεση νέων κυττάρων. Όπως και στην

φωτοσύνθεση έτσι και στην αναπνοή, άνοδος της θερμοκρασίας αέρα σημαίνει και αύξηση του ρυθμού αναπνοής μέχρι ένα όριο πέραν από το οποίο η αναπνοή αυξάνεται υπερβολικά σπαταλώντας μεγάλα ποσά ενέργειας. Η βέλτιστη θερμοκρασία στο θερμοκήπιο κατά την διάρκεια της μέρας θα πρέπει να δίνει την μέγιστη διαφορά μεταξύ της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής, δηλαδή θα πρέπει να παράγεται περισσότερη ενέργεια απ' ότι καταναλώνεται με στόχο την μέγιστη καθαρή φωτοσύνθεση. Της νυχτερινές ώρες η θερμοκρασία στο θερμοκήπιο θα πρέπει να διατηρείται σε χαμηλότερα επίπεδα έτσι ώστε να μειώνεται η αναπνοή αλλά όχι πέραν από ένα όριο μετά το οποίο παρεμποδίζεται η μεταφορά των θρεπτικών στοιχείων. Γενικότερα οι καλλιέργειες θερμοκηπίου αναπτύσσονται σε ημερήσια θερμοκρασία 3-7 °C υψηλότερη από την νυχτερινή με συννεφιασμένο καιρό και κατά 12 °C υψηλότερη τις ηλιόλουστες μέρες. Ενδεικτικά για την τομάτα οι βέλτιστες θερμοκρασίες ανάπτυξης είναι για την ημέρα 21-27 °C και 14-16 °C για την νύχτα (Μαυρογιαννόπουλος, 2005).

Η διαπνοή συνιστά την αποβολή του νερού κυρίως από τα φύλλα υπό την μορφή υδρατμών διαμέσου των στοματίων. Συνιστά κυρίως μια διαδικασία αποβολής της περίσσειας θερμότητας του φυτού ενώ παράλληλα επιτρέπει την μεταφορά θρεπτικών στοιχείων από την ρίζα στο υπέργειο μέρος του φυτού. Άνοδος της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση του ρυθμού διαπνοής όταν το φυτό τροφοδοτείται επαρκώς με νερό. Η διαπνοή εξαρτάται επίσης από την σχετική υγρασία του χώρου, από την ακτινοβολία, καθώς και από την ταχύτητα του αέρα.

Ο ανεπαρκής έλεγχος της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο μπορεί να οδηγήσει τα φυτά σε θερμική καταπόνηση λόγω υψηλής θερμοκρασίας με συμπτώματα όπως εγκαύματα, αναστολή της ανάπτυξης και βιοχημικές μεταβολές. Επίσης λόγω χαμηλών θερμοκρασιών έχουμε καθυστέρηση στην ανάπτυξη των φυτών η ακόμα χειρότερα πήξη του κυτταρικού χυμού και καταστροφή οργάνων ή ολόκληρου του φυτού. Επομένως η ρύθμιση της βέλτιστης θερμοκρασίας με την χρήση ψυκτικών μηχανημάτων το καλοκαίρι και συστημάτων θέρμανσης κατά την διάρκεια του χειμώνα κρίνεται αναγκαία. Η εφαρμογή θέρμανσης στις ψυχρές εποχές και η βελτιστοποίηση της θερμοκρασίας αέρα έχουν σημαντική επίπτωση στην πρωίμιση μιας παραγωγής αλλά και στην ποιότητα και ποσότητα της παραγωγής (Santamouris, 1994b).

2.2.2 Υγρασία

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που συνθέτουν το περιβάλλον του θερμοκηπίου και έχουν άμεσο αντίκτυπο στα φυτά είναι η υγρασία του αέρα. Η υγρασία μπορεί να περιγραφεί με όρους όπως:

Απόλυτη υγρασία: η ποσότητα των υδρατμών που περιέχεται σε 1 kg αέρα για συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία (g/kg αέρα).

Σχετική υγρασία: ο λόγος της ποσότητας υδρατμών του αέρα σε συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία προς την ποσότητα που θα είχε αν ήταν κορεσμένος (%).

Έλλειμμα κορεσμού υδρατμών: η διαφορά της απόλυτης υγρασίας του αέρα από το σύνολο των υδρατμών που θα είχε ο αέρας, αν ήταν κορεσμένος στην ίδια πίεση και θερμοκρασία. Εκφράζει την ποσότητα υδρατμών που μπορούν να προστεθούν στο θερμοκήπιο (g/kg αέρα).

Θερμοκρασία δρόσου: Η θερμοκρασία στην οποία ο αέρας ψύχεται και γίνεται κορεσμένος, με την προϋπόθεση ότι δεν μεταβάλλεται η περιεκτικότητά του σε υδρατμούς (°C).

Η υγρασία μέσα στο θερμοκήπιο εξαρτάται κυρίως από τον ρυθμό διαπνοής των φυτών και λιγότερο από την εξάτμιση από το έδαφος λόγω των καλυμμάτων εδάφους που ελαχιστοποιούν την εξάτμιση. Γενικά ο ρυθμός διαπνοής των φυτών εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας, την θερμοκρασία του φύλλου, την σχετική υγρασία και την ταχύτητα του αέρα μέσα στο χώρο του θερμοκηπίου. Η διαπνοή αποτελεί μια πολύ σημαντική λειτουργία και είναι υπεύθυνη για την ρύθμιση της θερμοκρασίας του φυτού καθώς και για την μεταφορά του χυμού μέσα σ' αυτό. Πολύ υψηλός ρυθμός διαπνοής μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα στο φυτό όταν αυτό δεν τροφοδοτείται αρκετά με νερό, με αποτέλεσμα το κλείσιμο των στομάτων, την αύξηση της θερμοκρασίας και την μείωση της φωτοσύνθεσης λόγω περιορισμένης ποσότητας σε διοξείδιο του άνθρακα. Κατά τους θερινούς μήνες όπου έχουμε υψηλή ακτινοβολία και θερμοκρασία το φυτό διαπνέει εντονότερα αλλά προτεραιότητα στην κίνηση του νερού έχουν τα φύλλα για την φωτοσύνθεση και μετά οι καρποί. Ως εκ τούτου το ασβέστιο που μεταφέρεται μαζί με το νερό δεν φτάνει για να καλύψει τις ανάγκες των καρπών με αποτέλεσμα την δημιουργία ξηρής σήψης κορυφής (τάπα) κυρίως στα κηπευτικά (τομάτα, πιπεριά). Η ξηρή σήψη κορυφής μπορεί επίσης να εμφανιστεί λόγω ακανόνιστου ποτίσματος και έντονης θερμοκρασίας στην φάση ανάπτυξης του καρπού. Επίσης έλλειψη ασβεστίου μπορεί να εμφανισθεί λόγω πολύ

χαμηλού ρυθμού διαπνοής κατά την διάρκεια του χειμώνα όπου στο θερμοκήπιο επικρατούν υψηλά ποσά σχετικής υγρασίας κατά την διάρκεια της νύχτας. Πιο συγκεκριμένα έχει αναφερθεί από τους Holder και Cockshull (1988) πως σε φυτά τομάτας σε περιβάλλον με σχετική υγρασία 95%, η μείωση της διαπνοής οδήγησε στην δυσκολότερη μετακίνηση του ασβεστίου με αποτέλεσμα την περιφερειακή ξήρανση των φύλλων.

Πέραν από την επίδραση που έχει στην διαπνοή των φυτών, η πολύ υψηλή σχετική υγρασία μέσα στο θερμοκήπιο μπορεί να διευκολύνει την ανάπτυξη διαφόρων μυκητολογικών ασθενειών.

2.2.3 Συμπύκνωση υδρατμών

Ένα σημαντικό φαινόμενο που σχετίζεται άμεσα με την υψηλή υγρασία μέσα στο θερμοκήπιο είναι η συμπύκνωση των υδρατμών του αέρα πάνω σε επιφάνειες που έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία από την θερμοκρασία δρόσου. Τέτοιες επιφάνειες είναι συνήθως τα δομικά μεταλλικά στοιχεία της κατασκευής, το κάλυμμα του θερμοκηπίου και λιγότερο τα φυτά επειδή συνήθως οι καλλιέργειες θερμαίνονται και τα φυτά έχουν παραπλήσια θερμοκρασία με την θερμοκρασία αέρα. Όσο πιο κοντά βρίσκεται η θερμοκρασία δρόσου στην θερμοκρασία αέρα τόσο υψηλότερη είναι η σχετική υγρασία και με μια μικρή πτώση της θερμοκρασίας ή αύξησης της υγρασίας ο αέρας μπορεί να κορεσθή και να έχουμε υγροποίηση των υδρατμών. Συνεπώς για να αποφύγουμε το φαινόμενο της συμπύκνωσης η θερμοκρασία των διαφόρων επιφανειών θα πρέπει να βρίσκεται πάνω από το σημείο δρόσου είτε με μείωση της υγρασίας είτε με αύξηση της θερμοκρασίας αέρα. Η επιφανειακή συμπύκνωση που συμβαίνει στο κάλυμμα του θερμοκηπίου (λόγω άμεσης επαφής με τον ψυχρότερο εξωτερικό αέρα), καθορίζεται από τις ιδιότητες του υλικού κάλυψης. Ένα μονό πολυαιθυλένιο δημιουργεί σταγόνες οι οποίες πέφτουν πάνω στο φύλλωμα ευνοώντας μυκητολογικές ασθένειες. Η γυάλινη οροφή αντιθέτως δεν δημιουργεί σταγόνες αλλά ένα φιλμ νερού το οποίο κυλάει στις άκρες. Επίσης υπάρχουν νέα πλαστικά καλύμματα με πρόσθετες ουσίες (anti-drip) τα οποία δημιουργούν μια μορφή μεμβράνης στην εσωτερική πλευρά τους αντί για σταγόνες. Ακόμη, τεχνικές όπως η χρήση διπλού πολυαιθυλενίου μειώνει κατά πολύ την δημιουργία συμπυκνώσεων λόγω του θερμότερου εσωτερικού καλύμματος.

2.3 Επίδραση διαφορετικών υλικών κάλυψης στο μικροκλίμα και την καλλιέργεια του θερμοκηπίου

Οι αλλαγές του μικροκλίματος μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές διαφορές στην ανάπτυξη και στην παραγωγικότητα των θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Ο ρυθμός φωτοσύνθεσης μπορεί να μειωθεί σε περίπτωση χαμηλού PAR (φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία) ενώ είναι γενικά αποδεκτό ότι η μείωση του φωτός οδηγεί αναλογικά σε μειωμένη παραγωγή (Challa and Schapendonk, 1984). Επίσης ο ρυθμός φωτοσύνθεσης μπορεί να αυξηθεί σε περιπτώσεις υψηλής υγρασίας (Acock et al., 1976; Bunce, 1984). Πιο συγκεκριμένα, στο αγγούρι η βλαστική ανάπτυξη του φυτού ενισχύθηκε από τα υψηλά ποσοστά υγρασίας είτε την μέρα ή την νύχτα, ενώ η τελική απόδοση σε καρπούς συνδέθηκε με την υψηλή υγρασία κατά την διάρκεια της μέρας (Bakker et al., 1987). Το πιο ανησυχητικό όσον αφορά την υψηλή υγρασία είναι ο κίνδυνος ανάπτυξης μυκητολογικών ασθενειών καθώς και φυσιολογικές διαταραχές, όπως η έλλειψη ασβεστίου. (Hand, 1988).

Οι Παπαδόπουλος και Hao (1997) βρήκαν πώς η μέση θερμοκρασία σε θερμοκήπια με διπλό πλαστικό ή ακρυλικό κάλυμμα είναι υψηλότερη σε σχέση με ένα γυάλινο θερμοκήπιο. Οι μεγαλύτερες διαφορές βρέθηκαν την περίοδο μεταξύ Δεκεμβρίου και Μαρτίου ενώ μετά τον Μάρτιο η διαφορές στην θερμοκρασία ήταν αμελητέες. Η μέση θερμοκρασία στα θερμοκήπια με ακρυλικό κάλυμμα και διπλό πλαστικό ήταν ίδια. Η υψηλότερη σχετική υγρασία παρατηρήθηκε στο διπλό πλαστικό και η χαμηλότερη στο γυάλινο ενώ η σημαντικότερη διαφορά συνέβη μεταξύ Ιανουαρίου και Μαρτίου. Αναφέρουν ακόμη πώς τα φυτά κάτω από το διπλό πλαστικό και το ακρυλικό κάλυμμα αναπτύχθηκαν ταχύτερα σε σχέση με αυτά στο γυάλινο θερμοκήπιο. Το ύψος, ο αριθμός των φύλλων και των ταξιανθιών ανά φυτό ήταν μεγαλύτερος στο διπλό πλαστικό και το ακρυλικό κάλυμμα. Στο σύνολο της εμπορεύσιμης παραγωγής τα θερμοκήπια με το διπλό πλαστικό και το ακρυλικό κάλυμμα είχαν ίση ή μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με το γυάλινο θερμοκήπιο.

Οι Παπαδόπουλος και Hao (1997) επεσήμαναν πως το γυάλινο θερμοκήπιο είχε την υψηλότερη περατότητα στο φάσμα PAR ενώ το διπλό πλαστικό την χαμηλότερη. Ο ρυθμός φωτοσύνθεσης των φυτών στο ακρυλικό και στο γυάλινο θερμοκήπιο ήταν παρόμοιος και υψηλότερος από αυτόν στο διπλό πλαστικό. Βρήκαν ακόμη πως τα φυτά που αναπτύχθηκαν κάτω από διπλό πλαστικό κάλυμμα

προσαρμόστηκαν καλύτερα στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου. Πιο συγκεκριμένα τα φυτά κάτω από το διπλό κάλυμμα είχαν το ίδιο μέγεθος με αυτά του γυάλινου θερμοκηπίου αλλά ήταν περισσότερα, με αποτέλεσμα να έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια για φωτοσύνθεση, πράγμα που αντιστάθμισε το γεγονός του χαμηλότερου φωτισμού κάτω από το διπλό πλαστικό. Η αποδοτικότητα της φωτοσύνθεσης ανά μονάδα φυλλικής επιφάνειας στο διπλό πλαστικό καθώς και στο γυάλινο θερμοκήπιο ήταν παρόμοια.

Η υψηλότερη θερμοκρασία αέρα μπορεί να ενισχύσει την αύξηση και ανάπτυξη του φυτού σε θερμοκήπια με διπλό κάλυμμα. Αυτή η αύξηση στην θερμοκρασία του αέρα μπορεί να αντισταθμίσει την απώλεια σε φώς, καθώς η υψηλή θερμοκρασία στα νεαρά φυτά προωθεί την φωτοσύνθεση. (Challa et al., 1995).

Οι Zhang et al., (1995) καταλήγουν στο συμπέρασμα πώς σε θερμοκήπια με διπλό πλαστικό κάλυμμα το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών (VPD) είναι κατά 0.2 kPa χαμηλότερο την μέρα και κατά 0.1 kPa χαμηλότερο την νύχτα σε σχέση με το μονό γυαλί. Παρόμοιες έρευνες δείχνουν 10% υψηλότερη υγρασία σε μονωμένα θερμοκήπια (διπλό γυαλί) κατά την διάρκεια ηλιόλουστων ημερών τον χειμώνα, αλλά χωρίς διαφορές τους θερινούς μήνες (van Winden and van Uffelen, 1984; Steinbuch και de Vooren, 1984). Ο Hand (1988) παρατήρησε πώς δεν υπάρχει καμία επίδραση πάνω στη φυσιολογία ή την ανάπτυξη των λαχανικών και των καλλωπιστικών φυτών που καλλιεργούνται μέσα σε θερμοκήπια όταν το VPD είναι μεταξύ 0.3 και 1kPa. Αντιθέτως, αρκετές καλλιέργειες επηρεάζονται αρνητικά όταν το VPD παίρνει τιμές άνω του 1 kPa. (Hoffman, 1979; Bakker, 1990).

Οι Cemek et al., (2006) βρήκαν πως η μέση μηνιαία θερμοκρασία στα θερμοκήπια με το διπλό πλαστικό και το IR+PE κάλυμμα ήταν υψηλότερη σε σχέση με τα UV+PE και το απλό πλαστικό. Η υψηλότερη μέση θερμοκρασία βρέθηκε στο θερμοκήπιο με το διπλό πλαστικό ενώ ακολουθεί το IR+PE, το UV+PE και το απλό πλαστικό. Η υψηλότερη και χαμηλότερη μέση θερμοκρασία παρατηρήθηκε τον μήνα Ιούλιο και Νοέμβριο αντίστοιχα. Η υψηλότερη σχετική υγρασία βρέθηκε στο θερμοκήπιο με το διπλό πλαστικό και ακολούθησε το IR+PE, PE και το UV+PE. Η υψηλότερη μέση μηνιαία σχετική υγρασία καταγράφηκε τον μήνα Οκτώβριο ενώ η χαμηλότερη τον μήνα Αύγουστο. Διαπίστωσαν επίσης πώς η θερμοκρασία αέρα ήταν 2-3 ° C υψηλότερη στο D-poly θερμοκήπιο σε σχέση με τα υπόλοιπα, ενώ η μεγαλύτερη διαφορά βρέθηκε τον πιο κρύο μήνα. Αυτή η διαφορά στη θερμοκρασία αντιστάθμισε το γεγονός ότι στο D-poly επικρατούσε χαμηλότερη ένταση του φωτός,

αφού στα νεαρά φυτά η υψηλή θερμοκρασία προωθεί την ανάπτυξη των φύλλων και την αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου φωτός. Το θερμοκήπιο με το απλό πλαστικό κάλυμμα είχε την μεγαλύτερη περατότητα στο φως με τη μέγιστη τιμή να καταγράφεται τον μήνα Ιούλιο, ενώ ακολούθησαν τα θερμοκήπια UV+PE, IR+PE και τέλος το διπλό πλαστικό. Οι Cemek et al., (2006) διαπίστωσαν πως το ύψος των φυτών καθώς και ο αριθμός των καρπών στο θερμοκήπιο με το διπλό πλαστικό ήταν σημαντικά μεγαλύτερος από τα υπόλοιπα θερμοκήπια. Επίσης η ξηρή ουσία των φύλλων στα θερμοκήπια UV+PE και PE ήταν υψηλότερη ενώ η φυλλική επιφάνειά τους ήταν χαμηλότερη σε σχέση με το IR+PE και το D-poly. Η υψηλότερη απόδοση βρέθηκε στο D-poly ενώ ακολούθησαν το IR+PE, το UV+PE και τέλος το απλό πλαστικό. Ο Cemek (2002) υπέδειξε πως τα θερμοκήπια με διπλό πλαστικό κάλυμμα είχαν υψηλότερη θερμοκρασία ενώ τα φυτά ήταν ψηλότερα. Οι Cemek et al., (2006) βρήκαν παρόμοια αποτελέσματα για την καλλιέργεια της μελιτζάνας κάτω από διπλό πλαστικό κάλυμμα. Ανέφεραν ακόμα πως η μελιτζάνα ανέπτυξε την μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια κάτω από το διπλό πλαστικό. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι στο D-poly επικρατούσε υψηλότερη θερμοκρασία και λιγότερο διαθέσιμο φως για τα φυτά. Αν και η φωτοσύνθεση αποτελεί την πιο καθοριστική παράμετρο για την ανάπτυξη του φυτικού ιστού, η απόδοση σε καρπούς είναι περισσότερο συνδεδεμένη με την συνολική έκταση της φυλλικής επιφάνειας. (Lawlor, 1995).

Μια απώλεια της τάξης του 5-20% στο ορατό φως ή στο φάσμα της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR), στα θερμοκήπια με διπλό πλαστικό, έχει βρεθεί από αρκετούς ερευνητές (Blom και Ingratta, 1985; Bauerle, 1981). Η θερμοκρασία αέρα, η υγρασία και η θερμοκρασία καλλιέργειας επηρεάζονται από την διαπερατότητα στο φως που έχουν τα διάφορα πλαστικά καλύμματα. Επίσης η βελτίωση που έχει επιτευχθεί στη μόνωση του θερμοκηπίου με τα διπλά πλαστικά και ακρυλικά καλύμματα οδήγησε στην αύξηση της υγρασίας στο εσωτερικό του. (Blom και Ingratta, 1985; Boulard et al., 1989). Άλλοι ερευνητές αναφέρουν πως στις Βόρειες χώρες η απώλεια σε φως κατά 1% προκαλεί μείωση της συνολικής παραγωγής κατά 1% (Briassoulis et al., 1997).

Ο van den Kieboom (1981) μελέτησε την διαπερατότητα διπλού πλαστικού φύλλου PE, στο φάσμα του PAR και βρήκε τιμές της τάξης του 0.50 με 0.55 σε σχέση με το 0.65 ενός μονού γυάλινου.

Γενικότερα ένα θερμοκήπιο με γυάλινη οροφή είναι περισσότερο διαπερατό στο φάσμα PAR σε σχέση με ένα διπλό πλαστικό. Κατά την διάρκεια του χειμώνα οι

διαπερατότητες 4 υλικών, γυαλί, διπλό πλαστικό anti-fog (1 έτους), διπλό πλαστικό anti-fog (3 ετών) και διπλό πλαστικό anti-fog με θερμικό φύλλο ήταν 0.68, 0.62, 0.65 και 0.60 αντίστοιχα. Κατά την διάρκεια των θερμών μηνών οι διαπερατότητες των υλικών ήταν 0.80, 0.69, 0.71, και 0.66 (Zhang et al., 1996). Οι διαφορές εξηγούνται από τις διαφορετικές κλίσεις του ηλίου (Magnani, 1987) καθώς και από την παρουσία πάγου και συμπύκνωσης στην επιφάνεια των υλικών.

2.4 Επίδραση της συμπύκνωσης των υδρατμών του καλύμματος στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και στην καλλιέργεια

Στα περισσότερα μη επεξεργασμένα πλαστικά υλικά κάλυψης, η συμπύκνωση των υδρατμών πάνω στο κάλυμμα εμφανίζεται υπό μορφή σταγόνων οι οποίες προκαλούν την μείωση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων του φωτός πάνω στις σταγόνες. (Von Elsner et al., 2000)

Το φαινόμενο της συμπύκνωσης των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος μπορεί να προκαλέσει αρκετά προβλήματα όπως η μείωση του εισερχόμενου φωτός λόγω ανακλάσεων, το κάψιμο στα φύλλα (φαινόμενο του φακού), το στάξιμο σταγόνων πάνω στην καλλιέργεια, με αποτέλεσμα την αύξηση της υγρασίας και την ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών. (Geoola και Peiper, 1994; Geoola και Kashti, 2004)

Οι Cemek και Demir (2005) συμφωνούν με τα αποτελέσματα των Jaffrin και Makhlouf (1990) πως τα πλαστικά καλύμματα σε υγρή φάση έχουν χαμηλότερη διαπερατότητα στο φώς σε σχέση με όταν είναι στεγνά.

Οι Geoola et al., (1994) ερεύνησαν τις οπτικές ιδιότητες διαφόρων πλαστικών καλυμμάτων. Σύγκριναν την διαπερατότητα του φωτός και βρήκαν πως σε στεγνό κάλυμμα το εισερχόμενο φώς ήταν περισσότερο σε σχέση με την υγρή φάση. Η μείωση της περατότητας του φωτός εξαιτίας της σκόνης πάνω στο κάλυμμα ήταν περίπου 10%. Επίσης, επεσήμαναν πως καλύμματα με αντισταγονικές ιδιότητες (anti-drop layer) είχαν υψηλότερη περατότητα στο φώς σε υγρή φάση απ ότι όταν ήταν στεγνά. Οι Jaffrin και Urban (1990) συμφωνούν πως ένα υγρό πλαστικό φύλλο το οποίο καλύπτεται συνεχώς από ένα λεπτό στρώμα νερού έχει παρόμοια ή ακόμα και ίση διαπερατότητα στο φώς σε σχέση με ένα στεγνό φύλλο.

Σύμφωνα με τον Gilby (1989) η συμπύκνωση των υδρατμών υπό μορφή σταγονιδίων πάνω στο κάλυμμα οροφής προκαλεί 15% μείωση στο εισερχόμενο φώς.

Η υγροποίηση πάνω στο κάλυμμα του θερμοκηπίου μπορεί να επηρεαστεί από την χημική δομή που χρησιμοποιείται για την επικάλυψη του υλικού. Ομοίως οι Dilara και Briasoulis (2000), επεσήμαναν πως οι διαφορετικές χημικές δομές στην επένδυση των υλικών κάλυψης επηρεάζουν τον βαθμό συμπύκνωσης.

Οι Cemek και Demir (2005) μελέτησαν διάφορους τύπους καλυμμάτων και κατέληξαν στο συμπέρασμα πως την χαμηλότερη περατότητα στο φως είχε το διπλό πλαστικό κάλυμμα ενώ ακολουθεί το (IR) πλαστικό και το (UV), ενώ το υψηλότερο ποσοστό παρατηρήθηκε στο απλό πολυαιθυλένιο (PE). Παρόμοια αποτελέσματα είχαν και οι Jaffrin και Makhlouf (1990). Η μείωση του εισερχόμενου φωτός μπορεί εν μέρει να αποδοθεί στην απόθεση της σκόνης πάνω στο υλικό. Οι Jaffrin και Marisot (1994) ανέφεραν μείωση ηλιακής ακτινοβολίας σε ποσοστό 40% από συνδυασμό σκόνης και συμπύκνωσης πάνω στο κάλυμμα.

Λόγω της ιδιαίτερης σημασίας του φαινομένου της συμπύκνωσης στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, αρκετοί ερευνητές (Walker και Walton 1971; Halleux et al., 1995) μελέτησαν την αλληλεπίδραση της συμπύκνωσης με την μεταφορά θερμότητας στο θερμοκήπιο. Όσον αφορά τις ανταλλαγές θερμότητας σε θερμοκήπια με κάλυμμα από πολυαιθυλένιο, συμφωνούν πως για τις ώρες όπου υπάρχει συμπύκνωση στο κάλυμμα οι απώλειες θερμότητας είναι χαμηλότερες, ενώ για το γυαλί τα αποτελέσματα είναι αντίστροφα. Οι Pieters et al., (1995) βρήκαν πως ένα κάλυμμα πολυαιθυλενίου σε υγρή φάση έχει χαμηλότερη περατότητα στην θερμική ακτινοβολία σε σχέση με τη στεγνή φάση. Επίσης, οι Pieters και Deltour (1997) αναφέρουν πως η συμπύκνωση πάνω στο κάλυμμα πολυαιθυλενίου οδήγησε σε μείωση των αναγκών για θέρμανση κατά 20% σε θερμοκήπιο με καλλιέργεια τομάτας, αντίθετα αύξησε τις ανάγκες θέρμανσης κατά 15% στην περίπτωση του γυαλιού.

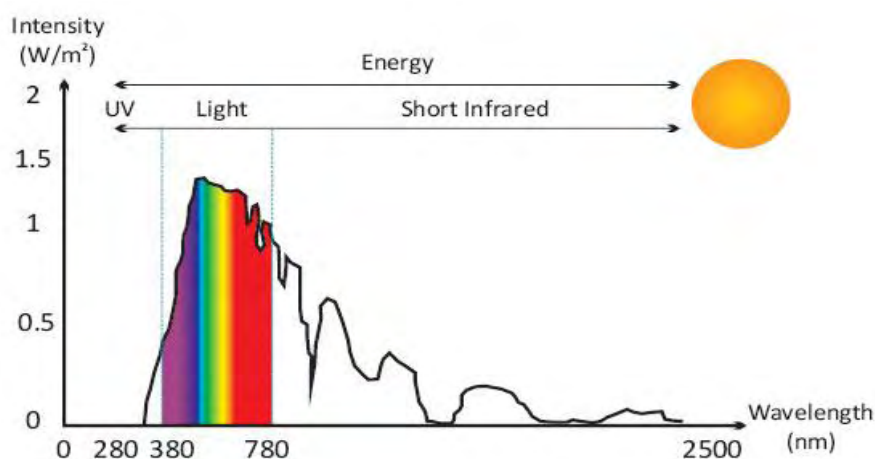
2.5 Ακτινοβολία

Η κύρια πηγή ενέργειας του θερμοκηπίου είναι η ηλιακή ακτινοβολία καθώς παίζει κυρίαρχο ρόλο στην φωτοσύνθεση των φυτών αλλά και στην θέρμανση του θερμοκηπίου. Η ηλιακή ακτινοβολία όπως και οι υπόλοιποι παράμετροι που επηρεάζουν την φωτοσυνθετική δραστηριότητα (CO₂, θερμοκρασία, νερό) όταν είναι ελλειμματική, μειώνει την φωτοσύνθεση και αντιστρόφως όταν είναι πολύ έντονη μειώνει τον ρυθμό της φωτοσύνθεσης βλάπτοντας τους χλωροπλάστες των φυτών.

Επίσης πολύ έντονη ηλιακή ακτινοβολία μειώνει την διάρκεια ζωής των πλαστικών καλυμμάτων του θερμοκηπίου, επηρεάζοντας σημαντικά τις ιδιότητές του.

Η ακτινοβολία από τον ήλιο καθώς και από τα υπόλοιπα σώματα (λόγω της θερμοκρασίας τους) εκπέμπεται σε διαφορετικά μήκη κύματος τα οποία έχουν διαφορετική ενέργεια η οποία αυξάνει όσο το μήκος κύματος μειώνεται. Η συνολική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο καθώς και από τα υπόλοιπα σώματα έχει εύρος από 200 ως 100.000 nm και διαχωρίζεται σε διαφορετικά φάσματα κάθε ένα από τα οποία έχει διαφορετική επίδραση, στα φυτά (φωτοσύνθεση, διαπνοή), στα πλαστικά υλικά κάλυψης (διάρκεια ζωής), καθώς και στο ενεργειακό ισοζύγιο του θερμοκηπίου (θέρμανση θερμοκηπίου).

Η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζεται από την ατμόσφαιρα (όζον, νέφη) καθώς και από την μόλυνση της (σωματίδια, σκόνη). Ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται από την ατμόσφαιρά και το υπόλοιπο την διαπερνά φτάνοντας στην γη. Έπειτα ένα μέρος αυτής ανακλάται ή απορροφάται από το κάλυμμα του θερμοκηπίου ενώ το υπόλοιπο το διαπερνά. Από αυτό το ποσοστό που μπαίνει στο χώρο του θερμοκηπίου μόνο το 1-5% χρησιμοποιείται από τα φυτά ενώ το υπόλοιπο επανεκπέμπεται ως θερμική ακτινοβολία η οποία ευθύνεται για την ανύψωση της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου (φαινόμενο του θερμοκηπίου). Το 98 % της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεταξύ 200-3000 nm και μόνο το 2% αυτής είναι πάνω από 3000nm.



Εικόνα 1. Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος.

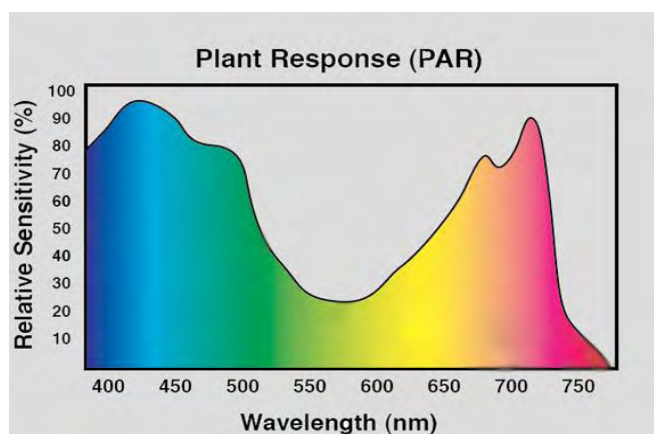
2.5.1 Υπεριώδης ακτινοβολία (100-380nm).

Από αυτό το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης φτάνει μόνο το εύρος από 280-380 nm ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από την στρατόσφαιρα (όζον). Η υπεριώδης ακτινοβολία αποτελείται από την UVC (100-280nm) η οποία στο μεγαλύτερο ποσοστό της δεν φτάνει στη γη, από την UVB (280-315nm), και από την UVA (315-380nm). Η UVB ακτινοβολία επηρεάζει τον χρωματισμό και το ύψος των φυτών αλλά ευθύνεται και για την αποδόμηση των πλαστικών καλυμμάτων του θερμοκηπίου. Η UVA ακτινοβολία επίσης ευθύνεται για την παλαίωση των πλαστικών φύλλων κάλυψης λόγω της δυνατότητας που έχει να καταστρέφει τους δεσμούς των οργανικών ενώσεων. Επιπροσθέτως η UVA ευνοεί την σποριοποίηση των μυκήτων ενώ τα έντομα την χρησιμοποιούν προκειμένου να προσανατολιστούν. Για τους παραπάνω λόγους χρησιμοποιούνται νέα πλαστικά φύλλα κάλυψης με πρόσθετες ουσίες έτσι ώστε το φύλλο να λειτουργεί επιλεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία και να μην είναι περατό σε ένα μέρος της. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να μειωθεί ο πληθυσμός των βλαβερών εντόμων (αλευρώδης, θρίπας), η ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών (βοτρυτής), (Antignus et al., 1997) καθώς και να επιμηκυνθεί ο χρόνος ζωής των καλυμμάτων.

2.5.2 Ορατή ακτινοβολία (380-780nm)

Αποτελεί την περιοχή του ορατού φάσματος την οποία αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι. Η ακτινοβολία η οποία έχει και τον σπουδαιότερο ρόλο στην αύξηση και ανάπτυξη των φυτών καλείται PAR (Photosynthetic Active radiation) και έχει εύρος από 400-700nm. Η μέγιστη απορρόφηση που γίνεται κατά την διαδικασία της φωτοσύνθεσης από τη χλωροφύλλη του φυτού γίνεται στο εύρος 400-520nm (ιώδες-μπλε) και από 625-700nm (κόκκινο). Στην περιοχή του μπλε πέραν από την φωτοσύνθεση επηρεάζεται σημαντικά ο θετικός φωτοτροπισμός, το άνοιγμα των στομάτων και η δημιουργία του κυτοπλάσματος. Στο εύρος 520-625nm (πράσινο-πορτοκαλί) η φωτοσύνθεση επηρεάζεται ελάχιστα λόγω της χαμηλότερης απορρόφησης σε αυτά τα μήκη κύματος. Πιο συγκεκριμένα η χλωροφύλλη ανακλά σε πολύ μεγάλο ποσοστό την περιοχή του πράσινου και γι αυτό τον λόγο τα φυτά φαίνονται πράσινα. Η περιοχή του κόκκινου επηρεάζει επίσης την φωτοσύνθεση, καθώς και την βλαστικότητα των σπόρων, την άνθηση και την ωρίμανση των φυτών.

Ο Benton Jones (1999) βρήκε πώς όταν υπάρχει αρκετό κόκκινο και λιγότερο μπλε φως διαθέσιμο για τα φυτά, τότε γίνονται ψιλόλιγνα με μεγαλύτερα μεσογονάτια διαστήματα, ενώ έχουν και πιο τρυφερά μέρη. Στην αντίστροφη περίπτωση τα φυτά είναι πιο σκληραγωγημένα, κοντύτερα και πιο σκούρα. Οι οπτικές ιδιότητες των πλαστικών καλυμμάτων του θερμοκηπίου επηρεάζουν σημαντικά τόσο της μορφογενετικές αλλαγές των φυτών καθώς και το σχήμα τους με αποτέλεσμα να επηρεάζουν άμεσα την εμπορική αξία της καλλιέργειας (Kittas και Baille, 1998).



Εικόνα 2. Απόκριση του φυτού στο εύρος της PAR ακτινοβολίας.

2.5.3 Υπέρυθρη ακτινοβολία

Η υπέρυθρη ακτινοβολία χωρίζεται σε τρία μέρη:

- Η περιοχή κοντά στο ερυθρό Far Red (700-800nm) επιδρά στην ανάπτυξη των φυτών επηρεάζοντας την φωτομορφογένεση και τον φωτοπεριορισμό. Ο Smith (1982) βρήκε πως η αύξηση του λόγου της ροής φωτονίων (Red/Far Red) βοηθά στην έκπτυξη πλάγιων βλαστών και μειώνει την επιμήκυνση αυτών. Αντιθέτως, μείωση του λόγου (Red/Far Red) μειώνει την πλάγια βλάστηση, αυξάνει την κυριαρχία κορυφής ενώ μειώνει την φυλλική επιφάνεια. Αυτή η περιοχή επηρεάζει αρκετά και την θερμοκρασία των φυτών.
- Η περιοχή Near Infra-Red (800-3000nm) δεν επηρεάζει τα φυτά αλλά μεταφέρει θερμότητα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια της ημέρας. Η NIR ακτινοβολία απορροφάται από τον εξοπλισμό του

θερμοκηπίου και αυξάνει την θερμοκρασία του σημαντικά, κάτι το οποίο είναι επιθυμητό την χειμερινή περίοδο. Η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της NIR γίνεται ανεπιθύμητη τους καλοκαιρινούς μήνες κυρίως στις Μεσογειακές χώρες και θα πρέπει να μειωθεί, είτε με επαρκή αερισμό και δροσισμό είτε με την επιλογή κατάλληλων υλικών κάλυψης τα οποία θα αντανakλούν μεγάλο μέρος της NIR.

- Η περιοχή Far Infra-Red (3000-100.000nm) μεταφέρει επίσης θερμότητα μέσα στο θερμοκήπιο αλλά είναι υπεύθυνη για τις απώλειες θερμότητας κατά την διάρκεια της νύχτας. Μόνο το 2% από αυτή την ακτινοβολία προέρχεται από τον ήλιο αλλά όλα τα σώματα μέσα στο χώρο του θερμοκηπίου (έδαφος, εξοπλισμός, φυτά) εκπέμπουν μεγάλους μήκους ακτινοβολία ανάλογα με την επιφάνεια τους και την θερμοκρασία τους. Η συγκράτηση αυτής της ακτινοβολίας από το κάλυμμα του θερμοκηπίου αυξάνει την θερμοκρασία του χώρου (φαινόμενο του θερμοκηπίου) ανάλογα με την διαπερατότητα κάθε υλικού. Η περατότητα των διάφανων υλικών των θερμοκηπίων στην θερμική ακτινοβολία διαφέρει σημαντικά, με το γυαλί να είναι σχεδόν αδιαπέρατο και το απλό πολυαιθυλένιο να είναι πάνω από 80% περατό στην FIR. Υπό αυτό το πρίσμα κατασκευάζονται νέα πολυαιθυλένια με μεγάλη απορρόφηση της FIR για την αποφυγή χαμηλών θερμοκρασιών κατά την διάρκεια της νύχτας.

Οι Giacomelli και Roberts (1993) απέδειξε πώς ο σκελετός καθώς και το υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου παίζουν καταλυτικό ρόλο στην ποσότητα ακτινοβολίας που περνά μέσα στο θερμοκήπιο όπως επίσης και στον λόγο της άμεσης προς την διάχυτη ακτινοβολία που αποτελεί και την ποσότητα που δέχεται τελικά το φυτό.

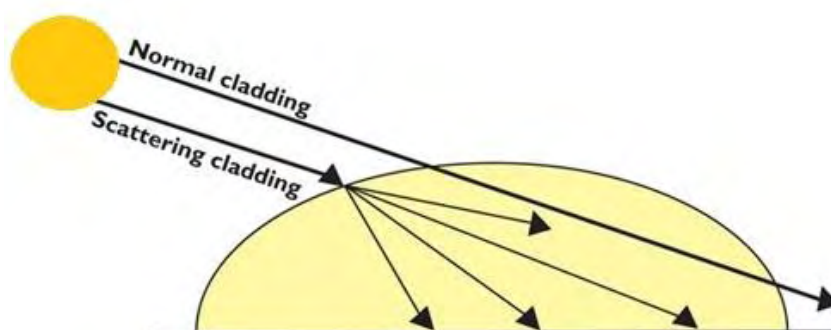
2.5.4 Άμεση και διάχυτη ακτινοβολία

Άμεση ηλιακή ακτινοβολία θεωρείται η ακτινοβολία που έρχεται απευθείας από τον ήλιο χωρίς να έχει υποστεί κάποιο βαθμό σκέδασης λόγω της ατμόσφαιρας. Η άμεση ακτινοβολία έχει ορισμένη κατεύθυνση και με την προϋπόθεση ότι υπάρχει καθαρός ουρανός, αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας. Λόγω των νεφών και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (σκόνη, σωματίδια) ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει στην γη υπό την μορφή διάχυτης ακτινοβολίας. Ακόμα

και χωρίς νέφη ένα 15% της ολικής ακτινοβολίας πρόκειται για διάχυτη. Διάχυτη ακτινοβολία θεωρείται η ακτινοβολία που έχει υποστεί σκέδαση λόγω της ατμόσφαιρας και στην περίπτωση που ο ουρανός είναι εξολοκλήρου νεφοσκεπής όλη η ακτινοβολία του ήλιου χαρακτηρίζεται ως διάχυτη. Σε αντίθεση με την άμεση ακτινοβολία, η διάχυτη προέρχεται από διάφορες κατευθύνσεις του ουράνιου θόλου όταν πρόκειται για οριζόντια επιφάνεια. Πέραν από την άμεση και διάχυτη ακτινοβολία υπάρχει και η ανακλώμενη ακτινοβολία που προέρχεται από τις γειτονικές επιφάνειες καθώς και η γήινη ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια του εδάφους λόγω της θέρμανσης της γης. Όλες οι ακτινοβολίες εκπέμπουν σε διαφορετικό φάσμα, με την άμεση και την διάχυτη να εκπέμπουν στα μικρά μήκη κύματος ενώ η γήινη στα μεγαλύτερα μήκη κύματος. Συνεπώς, οι διαφορετικοί τύποι ακτινοβολιών μεταφέρουν και διαφορετικά ποσά ενέργειας σε μία επιφάνεια.

2.5.5 Χαρακτηριστικά της διάχυσης του φωτός από το υλικό κάλυψης

Η διάχυση του φωτός συμβαίνει όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία συναντά το υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου και διασπάται σε περισσότερες ακτίνες με διαφορετικές κατευθύνσεις. (Goudriaan και van Laar, 1994) Μια καλλιέργεια χρησιμοποιεί καλύτερα το φως που δέχεται από περισσότερες γωνίες σε σχέση με το άμεσο φως λόγω της ομοιομορφίας που προσφέρει το διάχυτο φως πάνω στα φυτά. Επίσης λόγω του σκελετού του θερμοκηπίου δημιουργούνται αρκετές σκιάσεις στο εσωτερικό, πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει όταν το κάλυμμα προκαλεί μεγάλη διάχυση του φωτός.



Εικόνα 3. Η μετάδοση του φωτός μέσα από απλό κάλυμμα (normal cladding) και κάλυμμα διάχυσης(scattering cladding).

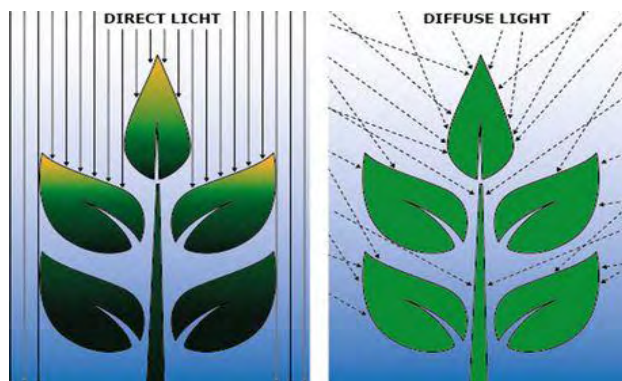
Πέραν από την καλύτερη διανομή του φωτός, μειώνεται και ο αριθμός των εγκαυμάτων στα φυτά σε περιπτώσεις έντονης ηλιακής ακτινοβολίας κυρίως τις μεσημεριανές ώρες. Πλαστικά φύλλα με υψηλή ικανότητα διάχυσης του φωτός έχουν την ιδιότητα να αντανακλούν ένα μεγάλο μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος, με αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου. Πλαστικά φύλλα που προκαλούν μεγάλη διάχυση του φωτός δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου επικρατεί υψηλή νέφωση διότι το φως έχει ήδη υποστεί σκέδαση από τα σύννεφα. Σε θερμοκήπια με διπλό φουσκωτό κάλυμμα αποφεύγεται η χρήση φύλλων διάχυσης λόγω μειωμένου φωτισμού.

2.5.5.1 Επίδραση της διάχυσης του φωτός στο μικροκλίμα και την καλλιέργεια

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί το κύριο συστατικό της φωτοσύνθεσης μέσω της οποίας αναπτύσσονται τα φυτά. Λόγο της μεγάλης σπουδαιότητας του φωτός, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι με σκοπό την μεγιστοποίηση της διαθέσιμης PAR ακτινοβολίας μέσα στο θερμοκήπιο, την αύξηση του κλάσματος της προσπίπτουσας PAR ακτινοβολίας, καθώς και τον βαθμό απόδοσής της με σκοπό την αύξηση του ρυθμού φωτοσύνθεσης από τα φυτά. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν κατασκευές θερμοκηπίων με υψηλή περατότητα στο φως, με υλικά όπως το γυαλί ή το καθαρό πολυαιθυλένιο καθώς και την χρήση συμπληρωματικού φωτισμού (λάμπες) για την αύξηση της διαθέσιμης PAR, την αύξηση του διάχυτου φωτός από τα υλικά κάλυψης καθώς και την αύξηση της φυλλικής επιφάνειας για την μεγιστοποίηση του κλάσματος της προσπίπτουσας PAR, και τέλος την βελτιστοποίηση όλων των κλιματικών παραμέτρων και ιδιαίτερα του CO₂ με σκοπό την μέγιστη φωτοσύνθεση. (Elings et al., 2012)

Ο λόγος για τον οποίο πρέπει να αυξηθεί το κλάσμα της διάχυτης προς την άμεση ακτινοβολία είναι η ομαλότερη κατανομή του φωτός της διάχυτης ακτινοβολίας πάνω στα φυτά. Οι Dueck et al., (2012) απέδειξαν πως η αύξηση της διάχυτης ακτινοβολίας οδήγησε σε αύξηση κατά 10% την παραγωγή τομάτας στο θερμοκήπιο, ενώ οι Markvart et al., (2010) βρήκαν αύξηση στην παραγωγή των χρυσάνθεμων κατά 9%.

Οι Brodersen et al., (2008) ανέφεραν πως τα διαφορετικά επίπεδα των φύλλων μιας καλλιέργειας ανταποκρίνονται διαφορετικά στο φως που έρχεται από διαφορετικές διευθύνσεις.



Εικόνα 4. Το άμεσο και διάχυτο φώς πάνω στα διαφορετικά στρώματα του φυτού.

Το άμεσο και διάχυτο φώς της PAR ακτινοβολίας, τα ποσοστά ηλιόλουστης και σκιασμένης φυλλικής επιφάνειας, η ανάκλαση και η απορρόφηση του φωτός από τα φύλλα και το έδαφος είναι τα κυριότερα συστατικά τα οποία επηρεάζουν τον ρυθμό της στιγμιαίας καθαρής φωτοσύνθεσης για ένα συγκεκριμένο επίπεδο μιας καλλιέργειας. Το ηλιόλουστο μέρος της καλλιέργειας δέχεται μαζί το άμεσο και το διάχυτο φώς σε αντίθεση με το σκιασμένο μέρος το οποίο δέχεται μόνο το διάχυτο.

Οι Elings et al., (2012) μελέτησαν τρεις διαφορετικούς τύπους γυάλινης κάλυψης με ικανότητα διάχυσης του φωτός από 45 έως 71% σε σχέση με ένα απλό γυαλί για μάρτυρα. Μελέτησαν την επίδραση της διάχυσης στην φωτοσύνθεση φυτών τομάτας σε διαφορετικά επίπεδα του φυτού και βρήκαν πως για όλα τα επίπεδα του φυτού ο ρυθμός καθαρής φωτοσύνθεσης ήταν μεγαλύτερος στην περίπτωση που όλο το φώς ήταν διάχυτο για μία καλοκαιρινή μέρα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η φωτοσύνθεση δεν αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της έντασης φωτισμού αλλά παρουσιάζει μια πτώση σε αυξημένες εντάσεις άμεσου φωτισμού σε σχέση με την καλύτερη διανομή που προσφέρει το διάχυτο φως. Πιο συγκεκριμένα 100 μmol άμεσης PAR ακτινοβολίας που δέχεται μια ηλιόλουστη επιφάνεια φύλλων καταλήγει σε μικρότερο βαθμό καθαρής φωτοσύνθεσης σε σχέση με 50 μmol διάχυτης PAR που δέχεται μια ηλιόλουστη επιφάνεια φύλλων και αλλά 50 μmol που δέχεται μια σκιασμένη επιφάνεια. Η άμεση ακτινοβολία PAR απορροφήθηκε καλύτερα μόνο από τα πάνω στρώματα του φυτού κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου, αλλά δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές στην απορρόφηση της άμεσης και διάχυτης PAR κατά την διάρκεια της θερινής περιόδου. Παρ' όλα αυτά και για τις δύο περιόδους ο ρυθμός καθαρής φωτοσύνθεσης ήταν υψηλότερος για την περίπτωση της διάχυσης.

Η παραγωγή καρπών τομάτας αυξήθηκε κατά 8-11% από τα μέσα Ιουνίου μέχρι και τον Νοέμβριο.

Λόγω της υψηλής έντασης ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ανοιξιάτικης και θερινής περιόδου η τεχνική της σκίασης με εσωτερικές κουρτίνες, εξωτερικά σκίαστρα ή άσπρισμα των υλικών είναι αρκετά διαδεδομένη με σκοπό να αποφεύγονται οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες και το κάψιμο των τρυφερών φύλλων και ανθών. Η σκίαση οδηγεί σε λιγότερες βλάβες από καψίματα αλλά με το κόστος της χαμηλότερης διάδοσης του φωτός μέσα στο θερμοκήπιο. Σε καλοκαιρινές συνθήκες σε καλλιέργεια τριανταφυλλιάς λόγω της υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία των φυτών και της υψηλής υγρασίας η φωτοσύνθεση μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά και γι' αυτό τον λόγο γίνεται σκίαση της καλλιέργειας. (Dieleman et al., 2007).

Άλλοι ερευνητές (García et al., 2012) μελέτησαν την επίδραση της διάχυσης του φωτός στον ρυθμό της φωτοσύνθεσης, την ανάπτυξη και παραγωγή φυτών τριανταφυλλιάς στο θερμοκήπιο. Το πείραμα έγινε στο Wageningen της Ολλανδίας σε δύο θερμοκήπια εξοπλισμένα με κάλυψη από γυαλί. Το θερμοκήπιο της διάχυσης είχε επίσης την ιδιότητα να αντανακλά λιγότερο φως (Anti Reflection coating) ενώ το δεύτερο ήταν εξοπλισμένο με απλό καθαρό γυαλί. Τα φυτά τριανταφυλλιάς που αναπτύχθηκαν κάτω από το γυαλί της διάχυσης σε σύγκριση με τα φυτά του μάρτυρα (απλό γυαλί) είχαν περισσότερα λουλούδια κατά 5.2% και υψηλότερο βάρος σε βιομάζα κατά 6.1%. Επίσης στο θερμοκήπιο της διάχυσης η ανάγκη για σκίαση ήταν μικρότερη με αποτέλεσμα να χρειάζεται λιγότερος συμπληρωματικός φωτισμός πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερο ενεργειακό κέρδος.

Οι Hemming et al., (2008 a) μελέτησαν την επίδραση του διάχυτου φωτός σε καλλιέργεια αγγουριού καθώς και σε ανθοκομικά φυτά και βρήκαν πως τα φυτά και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιούσαν την διάχυτη ακτινοβολία πιο αποδοτικά σε σχέση με το άμεσο φως. Πιο συγκεκριμένα αναφέρουν πως το διάχυτο φως εισχωρεί καλύτερα στα μεσαία στρώματα της καλλιέργειας και αυτό οδηγεί σε καλύτερη οριζόντια διάδοση του φωτός μέσα στο θερμοκήπιο. Για την καλλιέργεια του αγγουριού το φως της διάχυσης απορροφάται σε μεγαλύτερο βαθμό από τα μεσαία φύλλα με αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού ρυθμού φωτοσύνθεσης, ενώ η θερμοκρασία των φύλλων στα ανώτερα στρώματα ήταν 0.2-0.8 °C χαμηλότερη. Στις ημέρες με καθαρό ουρανό τα μεσαία στρώματα του φυτού χρησιμοποιούσαν καλύτερα το φως ενώ δεν παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ άμεσου και διάχυτου

φωτός σε περιόδους με συννεφιασμένο καιρό. Επίσης η παραγωγή καρπών αγγουριού αυξήθηκε κατά 4.3% και ο αριθμός των αγγουριών κατά 7.8% ακόμα και αν η διαπερατότητα του φωτός ήταν μειωμένη κατά 4% στο θερμοκήπιο της διάχυσης. Οι ερευνητές κατέληξαν σε παρόμοια συμπεράσματα και για τα ανθοκομικά φυτά με τον ρυθμό ανάπτυξης αυτών να είναι αυξημένος κάτω από την επίδραση του διάχυτου φωτός. Ειδικότερα, το χρυσάνθεμο ήταν ψηλότερο, με περισσότερους βλαστούς, περισσότερα φύλλα, μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια, μεγαλύτερο φρέσκο και ξηρό βάρος βλαστών και φύλλων καθώς και περισσότερα άνθη. Οι διαφορές που βρέθηκαν στα ανθοκομικά φυτά ήταν εμφανής μέχρι και τα τέλη Σεπτεμβρίου ενώ πέραν από αυτό το σημείο τα μειονεκτήματα από την χαμηλότερη διάδοση του φωτός επικράτησαν των θετικών επιδράσεων της διάχυσης.

Σε περιπτώσεις ακραίων τιμών άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας το ανώτερο επίπεδο μιας καλλιέργειας που είναι και περισσότερο εκτεθειμένο μπορεί να οδηγηθεί σε φωτοαναστολή με αποτέλεσμα την μείωση της φωτοσύνθεσης (Johnson και Smith, 2006). Αυτές οι καταστάσεις μπορούν να αποφευχθούν με την χρήση υλικών κάλυψης που διαχέουν το φως.

Οι Dueck et al., (2012) ανέφεραν πως σε θερμοκήπιο με απλό γυαλί τα ανώτερα φύλλα φυτών τομάτας είχαν αρκετά υψηλότερη θερμοκρασία τις μεσημεριανές ώρες, σε σχέση με αυτά που αναπτύσσονταν κάτω από γυαλί με ικανότητα διάχυσης του φωτός. Η διαφορά θερμοκρασίας που είχε ο αέρας του θερμοκηπίου σε σχέση με τα φυτά του μάρτυρα (clear glass) έφτανε και τους 6 °C ενώ δεν ξεπερνούσε τους 2 °C για τα φυτά κάτω από το γυαλί της διάχυσης. Η παραγωγή καρπών τομάτας ήταν 9-11% υψηλότερη κάτω από την επίδραση του διάχυτου φωτός στα θερμοκήπια με κάλυψη από γυαλί με ικανότητα διάχυσης από 45-72%. Επίσης το μέσο βάρος των καρπών ήταν 5-8 gr μεγαλύτερο για τα φυτά της διάχυσης. Τα θερμοκήπια της διάχυσης δεν χρειάστηκαν περισσότερη σπατάλη ενέργειας προκειμένου να συντηρηθεί η κατάλληλη θερμοκρασία αέρα σε σχέση με το απλό γυαλί. Τέλος, τα φυτά κάτω από την επίδραση του διάχυτου φωτός ήταν λιγότερα ευαίσθητα στον βοτρυτή.

Το κεφάλαιο 2 ήθελα να βοηθήσει στην κατανόηση της επίδρασης που έχουν τα υλικά κάλυψης στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, στην εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση, καθώς και στην ανάπτυξη και απόδοση της καλλιέργειας. Τα ευρήματα των παλαιότερων εργασιών που σχετίζονται με τα υλικά κάλυψης θα συγκριθούν με

τα ευρήματα της παρούσας μελέτης προκειμένου να γίνει η συζήτηση των αποτελεσμάτων στο κεφάλαιο 5.

3 Υλικά και Μέθοδοι

3.1 Εγκατάσταση του πειράματος

Το πείραμα διεξήχθη στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή του Βελεστίνου, σε απόσταση 17 km από τον Βόλο, με γεωγραφικό πλάτος $39^{\circ} 22'$, γεωγραφικό μήκος $22^{\circ} 44'$ και υψόμετρο 85 m. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε κατά την διάρκεια της περιόδου Φεβρουάριος - Ιούλιος 2013.

3.1.1 Τα θερμοκήπια

Χρησιμοποιήθηκαν τρία παρόμοια τροποποιημένα τοξωτά θερμοκήπια έκτασης 160 m^2 το καθένα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Μήκος 20 m
- Πλάτος 8 m,
- Ύψος ορθοστάτη 2.4 m,
- Ύψος κορφιά 4.1 m.



Εικόνα 5. Τα τρία θερμοκήπια του πειράματος στο αγρόκτημα του Βελεστίνου.

Όλα τα θερμοκήπια είναι κατασκευασμένα από γαλβανισμένο χάλυβα και είναι καλυμμένα με λευκό πλαστικό εδάφους. Είναι εφοδιασμένα με τον ίδιο εξοπλισμό (σύστημα λίπανσης, αερισμού και θέρμανσης) αλλά καλύφθηκαν με διαφορετικά φύλλα πολυαιθυλενίου το καθένα. Στο πρώτο θερμοκήπιο που επιλέχθηκε ως μάρτυρας εγκαταστάθηκε ένα απλό πλαστικό κάλυμμα πολυαιθυλενίου PE, στο δεύτερο ένα κάλυμμα με μεγάλη ικανότητα διάχυσης του

φωτός, ενώ το τρίτο θερμοκήπιο καλύφθηκε με το διπλό φουσκωτό κάλυμμα (δύο απλά φύλλα σε απόσταση 10 εκατοστών). Όλα τα πλαστικά καλύμματα κατασκευάστηκαν από τα Πλαστικά Κρήτης ΑΒΕΕ. Η εγκατάσταση των υλικών έγινε από 24 έως 28 Ιανουαρίου 2013 ενώ χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τύποι καλύμματος για κάθε μεταχείριση:

- **Gr 1** (Μάρτυρας-Clear)
- **Gr 2** (Διάχυσης-Diffuse)
- **Gr 3** (Διπλό Φουσκωτό-Double)

Θερμοκήπιο	Κωδικός υλικού	Διάχυση	Anti-drip	Διαπερατότητα στη θερμική ακτινοβολία
Clear (PE)	TUV 3992	Μικρή	Ναι	18%
Diffuse (PE)	TUV 3942	Μέση	Όχι	17%
Double (PEx2)	Εξωτερικό UV 2996	Μικρή	Όχι	50%
	Εσωτερικό TUV 3992	Μικρή	Ναι	18%

***Πίνακας 1.** Χαρακτηριστικά των υλικών κάλυψης που χρησιμοποιήθηκαν για την κάλυψη των θερμοκηπίων, όπως αυτά δίνονται από την Πλαστικά Κρήτης ΑΒΕΕ.*

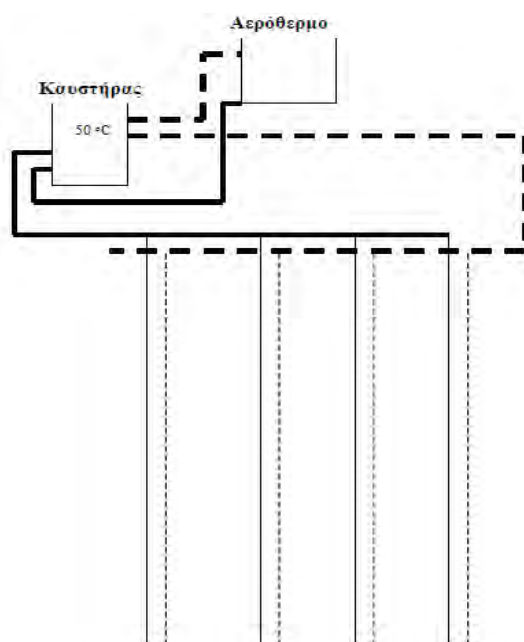
3.1.1.1 Αερισμός

Και τα τρία θερμοκήπια του πειράματος ήταν εξοπλισμένα και από τις δύο πλευρές με πλαϊνά παράθυρα διαστάσεων 15 m πλάτος και 0.9 m ύψος, καθώς και με ένα ενιαίο παράθυρο οροφής μήκους 20 m. Τα παράθυρα ελέγχονταν αυτόματα από τον κεντρικό υπολογιστή και άρχιζαν να ανοίγουν μετά τους 23 °C.

3.1.1.2 Θέρμανση

Κάθε θερμοκήπιο ήταν εξοπλισμένο με έναν καυστήρα 48.8 KW και με έναν λέβητα ο οποίος ζεσταίνει το νερό στους 50 °C και το διοχέτευε στο επιδαπέδιο δίκτυο σωληνώσεων καθώς και σε ένα αερόθερμο οροφής τοποθετημένο στο βόρειο άκρο του θερμοκηπίου σε ύψος 3.5 m πάνω από το έδαφος. Οι επιδαπέδιοι σωλήνες ήταν από PVC μαύρου χρώματος και εκτείνονταν σε όλο το μήκος του θερμοκηπίου. Οι σωλήνες ήταν τοποθετημένοι κάτω από τους πάγκους φύτευσης και για κάθε σειρά καλλιέργειας αντιστοιχούσε ένας σωλήνας στον οποίο κυλούσε το ζεστό νερό και ένας σωλήνας επιστροφής. Το αερόθερμο άρχισε να λειτουργεί την ημέρα στους 18 °C και την νύχτα στους 12 °C. Η επιδαπέδια θέρμανση λειτουργούσε

συμπληρωματικά όταν δεν μπορούσε το αερόθερμο να διατηρήσει την επιθυμητή θερμοκρασία. Και τα δύο συστήματα θέρμανσης ελέγχονταν από έναν κεντρικό logger ο οποίος κατέγραφε συνεχώς την θερμοκρασία του χώρου.



Σχήμα 5. Διάταξη του συστήματος θέρμανσης μέσα στα θερμοκήπια. Οι συνεχόμενες γραμμές αντιστοιχούν στους σωλήνες εισόδου με ζεστό νερό, ενώ οι διακεκομμένες στους σωλήνες επιστροφής.

3.2 Εγκατάσταση της καλλιέργειας

Η καλλιέργεια ήταν τομάτα, *Lycopersicon esculentum* της ποικιλίας *zizel*. Η μεταφύτευση των φυτών έγινε στις 15 Φεβρουαρίου 2013 όταν το φυτό είχε 4 πραγματικά φύλλα. Κάθε θερμοκήπιο είχε 8 σειρές με 40 φυτά ανά σειρά και σε αποστάσεις 0.3 m επί της γραμμής και 0.7 m μεταξύ των σειρών, 2.1 φυτά/m². Το υπόστρωμα της καλλιέργειας ήταν πετροβάμβακας τύπου Grodan, ενώ όλα τα φυτά είχαν παρόμοια λίπανση και δέχονταν τις ίδιες καλλιεργητικές φροντίδες.



Εικόνα 6. Η καλλιέργεια στο στάδιο της μεταφύτευσης στις 15/2/2013.

3.2.1 Άρδευση-Λίπανση

Η υδροπονική καλλιέργεια αρδεύεται με σύστημα στάγδην άρδευσης με την βοήθεια σταλλακτών παροχής 1L/h^{-1} . Η ώρα και η δόση άρδευσης ρυθμίζονται από την εξίσωση εξατμισοδιαπνοής Penman- Monteith στην οποία συνυπολογίζονται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, το έλλειμμα κορεσμού, η θερμοκρασία καθώς και η φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας. Το θρεπτικό διάλυμα παρασκευάζονται βάση ενός λογισμικού το οποίο ρύθμιζε τις αναλογίες των θρεπτικών καθώς και τις τιμές της αγωγιμότητας και του pH του διαλύματος. Η σύσταση του θρεπτικού διαλύματος δίνεται στον πίνακα 2.

<i>EC</i>	2,1	dS/m			
<i>pH</i>	5,5		<i>C_{NaCl}</i>	2	mmol/L
<i>K</i>	8	mmol/L	<i>C_{Fe}</i>	15	μmol/L
<i>Ca</i>	3	mmol/L	<i>C_{Mn}</i>	10	μmol/L
<i>Mg</i>	1,6	mmol/L	<i>C_{Zn}</i>	5	μmol/L
<i>NO3</i>	13,2	mmol/L	<i>C_{Cu}</i>	0,8	μmol/L
<i>NH4</i>	1,8	mmol/L	<i>C_B</i>	24	μmol/L
<i>H₂PO₄⁻</i>	1,3	mmol/L	<i>C_{Mo}</i>	0,5	μmol/L

Πίνακας 2. Οι συγκεντρώσεις των μακροστοιχείων και ιχνοστοιχείων του θρεπτικού διαλύματος.



Εικόνα 7. Η καλλιέργεια στο θερμοκήπιο της διάχυσης στις 20/3/2013.



Εικόνα 8. Η καλλιέργεια στο θερμοκήπιο με το διπλό φουσκωτό κάλυμμα στις 11/4/2013.

3.2.2 Καλλιερητικές τεχνικές

Η καλλιέργεια και στα τρία θερμοκήπια δέχτηκε τις ίδιες καλλιερητικές φροντίδες. Πιο συγκεκριμένα τα φυτά αναπτύχθηκαν μονοστέλεχα, υποστηριζόμενα από σπάγκους οι οποίοι συγκρατούνταν με μεταλλικούς γάντζους πάνω στα σύρματα που διέτρεχαν όλο το μήκος του θερμοκηπίου. Κάθε εβδομάδα αφαιρούνταν οι πλάγιοι βλαστοί της καλλιέργειας ενώ μετά την συγκομιδή των πρώτων καρπών άρχισε να καθαρίζεται η καλλιέργεια από τα χαμηλότερα φύλλα με σκοπό τον καλύτερο αερισμό και την αποφυγή μυκητολογικών ασθενειών. Επίσης σε κάθε ανθοταξία αφήνονταν να μεγαλώσουν 5 καρποί ενώ σε αρκετές περιπτώσεις όπου οι καρποί είχαν προσβληθεί από ξηρή σήψη κορυφής (τάπα), αφήνονταν μόνο 2 με 3.



Εικόνα 9. Η καλλιέργεια σε πλήρη ανάπτυξη στις 14/5/2013.

Για τον έλεγχο των εντόμων χρησιμοποιήθηκαν κίτρινες και μπλε κολλητικές παγίδες για την παρακολούθηση κυρίως του θρίπα και του αλευρώδη. Επίσης υπήρχαν παγίδες νερού διαμέτρου 40 cm για τον έλεγχο της *Tuta absoluta*.

3.3 Μετρήσεις

Για την αξιολόγηση των πλαστικών υλικών έγιναν μετρήσεις προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των υλικών στα παρακάτω:

- το μικροκλίμα του θερμοκηπίου με έμφαση στην ακτινοβολία
- την κατανάλωση ενέργειας στο θερμοκήπιο
- την ανάπτυξη και παραγωγή της καλλιέργειας

3.3.1 Κλιματικές μετρήσεις

Για την αξιολόγηση της επίδρασης των υλικών κάλυψης στο μικροκλίμα των θερμοκηπίων γινόταν καταγραφή των παρακάτω μετρήσεων:

Μέσα στα θερμοκήπια

- Θερμοκρασία αέρα
- Σχετική υγρασία αέρα
- Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας
- Καθαρή ακτινοβολία
- Διάχυτη ακτινοβολία
- Φασματική περατότητα
- Θερμοκρασία καλύμματος στην εσωτερική πλευρά
- Θερμοκρασία καλλιέργειας

Επίσης καταγράφονταν και οι μετρήσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος από τον μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται δίπλα στα θερμοκήπια του αγροκτήματος. Οι μετρήσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος περιελάμβαναν την θερμοκρασία και υγρασία του αέρα, την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, την καθαρή ακτινοβολία, την διάχυτη ακτινοβολία, καθώς και την ταχύτητα και διεύθυνση του αέρα.

Για κάθε θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκε ένα ψυχρόμετρο της εταιρίας Delta – T devices (model VP1, Cambridge, UK) το οποίο τοποθετήθηκε στο κέντρο του θερμοκηπίου σε ύψος 1.5 m πάνω από το έδαφος και μετρούσε την θερμοκρασία ξηρού βολβού (T_d °C) και υγρού βολβού (T_w °C). Από αυτά τα δεδομένα βρέθηκε η σχετική υγρασία (RH%) του αέρα με την χρήση των κατάλληλων σχέσεων.

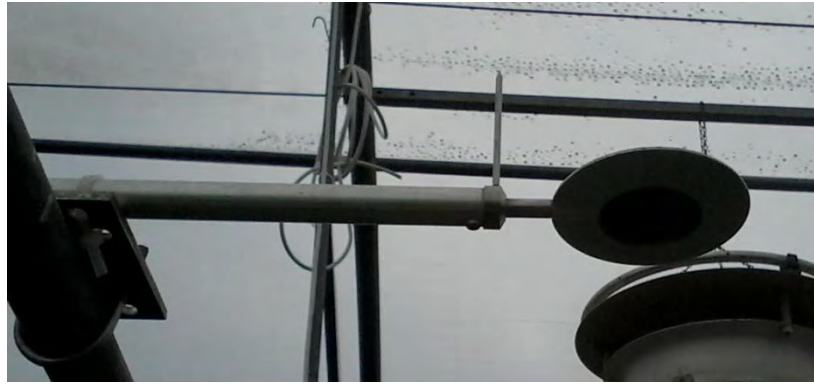
Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια μετρήθηκε με την βοήθεια του πυρανομέτρου CMP 11 της εταιρίας Kipp & Zonen. Το πυρανόμετρο μετρούσε την ολική ηλιακή ακτινοβολία (άμεση και διάχυτη) σε

W/m². Το CM11 είναι όργανο υψηλής απόδοσης, και ανταποκρίνεται πλήρως στο ISO 9060. Στην εικόνα 10 φαίνεται ο ημισφαιρικός θόλος, μέσα στον οποίο υπάρχουν τα ενεργά στοιχεία, όπως και το προστατευτικό κάλυμμα με το οποίο είναι συνδεδεμένος ο αισθητήρας θερμότητας. Ακόμα και σε μεγάλη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (πάνω από 1000W/m²) η αύξηση της θερμότητας δεν υπερβαίνει τους 3 °C με αποτέλεσμα την ελάχιστη μεταφορά θερμότητας στον ημισφαιρικό θόλο και την ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Η κατασκευή στηρίζεται σε τρία βιδωτά πόδια. Τα πυρανόμετρα τοποθετήθηκαν στο κέντρο των θερμοκηπίων σε ύψος 2.5m από το έδαφος.



Εικόνα 10. Το πυρανόμετρο CMP 11.

Η καθαρή ακτινοβολία μέσα και έξω από τα θερμοκήπια μετρήθηκε με το net radiometer NR Lite2 της Kipp & Zonen εικόνα 11. Η καθαρή ακτινοβολία εκφράζει το ισοζύγιο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος που ανακλάται από την επιφάνεια της γης. Γενικότερα η καθαρή ακτινοβολία παίρνει θετικές τιμές ην ημέρα και αρνητικές κατά την διάρκεια της νύχτας. Το ραδιόμετρο NR Lite2 τοποθετήθηκε στο μέσον του θερμοκηπίου, πάνω από την καλλιέργεια.



Εικόνα 11. Το net radiometer NR Lite 2 εγκατεστημένο στο θερμοκήπιο.

Η διάχυτη ακτινοβολία που δέχεται κάθε θερμοκήπιο μετρήθηκε με την χρήση του οργάνου CM121 (δαχτυλίδι σκίασης) της Kipp & Zonen πάνω στο οποίο προσαρμόστηκε ένα πυρανόμετρο CMP 11. Η αρχή λειτουργίας του δαχτυλιδιού σκίασης εικόνα 11 είναι να σκιάζει συνεχώς τον θόλο του πυρανόμετρου έτσι ώστε να εμποδίζεται η άμεση ακτινοβολία να φτάσει στον αισθητήρα. Με το CM121 μπορεί να προσδιοριστεί η ποσότητα της διάχυτης ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας, μπορεί να προσαρμοστεί για όλα τα γεωγραφικά πλάτη και για κεκλιμένες επιφάνειες. Το δαχτυλίδι σκίασης θα πρέπει να έχει προσανατολισμό τον βορρά και να ρυθμιστεί έτσι ώστε όλος ο θόλος του πυρανόμετρου να είναι σκιασμένος. Κάθε μία με δυο ημέρες γίνονταν διορθώσεις στην κλίση του δαχτυλιδιού με την βοήθεια του εγχειριδίου. Το όργανο τοποθετήθηκε στο κέντρο κάθε θερμοκηπίου σε ύψος 2.5m και παρέμεινε εκεί για μία εβδομάδα. Μετά από μία εβδομάδα τοποθετήθηκε στο επόμενο θερμοκήπιο με τον ίδιο τρόπο. Επιλέχτηκαν ηλιόλουστες ημέρες έτσι ώστε το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας να μην διαχέεται από την ατμόσφαιρα. Οι τιμές της διάχυτης ακτινοβολίας καταγράφονταν από τον κεντρικό data logger κάθε 10 λεπτά ταυτόχρονα με τις τιμές ολικής ακτινοβολίας για το θερμοκήπιο στο οποίο γινόταν η μέτρηση. Η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών ακτινοβολίας, ολική-διάχυτη, δίνει την άμεση ακτινοβολία.

Όλες οι παραπάνω μετρήσεις καταγράφονταν από έναν κεντρικό data logger (ένας σε κάθε θερμοκήπιο και ένας στον μετεωρολογικό σταθμό) ο οποίος μετρούσε ανά 30 sec και κατέγραφε τον μέσο όρο κάθε 10 min. Ο data logger που χρησιμοποιήθηκε ήταν της εταιρίας Delta-T Devices Cambridge, UK, μοντέλο DL3000. Τα δεδομένα συλλέγονταν από φορητό υπολογιστή για την επεξεργασία και την ανάλυση των μετρήσεων.



Εικόνα 12. Το δαχτυλίδι σκίασης CM121 εγκατεστημένο στο θερμοκήπιο.

Η φασματική περατότητα των υλικών κάλυψης μετρήθηκε με την βοήθεια του φορητού σπεκτροραδιομέτρου (Li – Cor 1800, Lincoln, NE, USA) . Οι μετρήσεις έγιναν μέσα και έξω από τα θερμοκήπια μεταξύ των ωρών 11:00 με 13:00 και με καθαρό ουρανό. Συνολικά έγιναν 6 μετρήσεις σε διάφορες χρονικές περιόδους του πειράματος. Η φασματική περατότητα κάθε υλικού βρέθηκε από το κλάσμα της περατότητας της ακτινοβολίας μέσα στο θερμοκήπιο προς την ακτινοβολία που φτάνει στη γη χωρίς να παρεμβάλλεται κάποιο εμπόδιο. Το σπεκτροραδιόμετρο Li – Cor 1800 μετρούσε ανά 1 nm στο εύρος 350 έως 1100 nm. Όλες οι μετρήσεις πάρθηκαν από το κέντρο του θερμοκηπίου σε ύψος 1,5 m (χωρίς να σκιάζεται ο αισθητήρας του οργάνου από τα φυτά) και με κλειστά όλα τα παράθυρα.



Εικόνα 13. Το σπεκτροραδιόμετρο Li - Cor 1800.

Μετά το τέλος της μέτρησης το όργανο συνδεόταν με υπολογιστή και τα δεδομένα επεξεργάζονταν σε υπολογιστικό φύλλο του excel έτσι ώστε να βρεθεί το ποσοστό περατότητας της ακτινοβολίας στις παρακάτω φασματικές περιοχές:

- **UVA** (340nm-400nm)
- **Blue** (400nm-500nm)
- **PAR** (400nm-700nm)
- **Red** (600nm-700nm)
- **Far Red** (700nm-800nm)
- **Near infra-Red** (700nm-1100nm)
- **Total** (340nm-1100nm)

Η θερμοκρασία του καλύμματος μετρήθηκε με θερμοζεύγη χαλκού – κοσταντάνης τύπου T, τα οποία τοποθετήθηκαν στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος με κολλητική ταινία, ενώ συνδέθηκαν με data logger ο οποίος κατέγραφε την θερμοκρασία του πλαστικού υλικού κάθε 10 λεπτά.

Η θερμοκρασία της καλλιέργειας μετρήθηκε επίσης με θερμοζεύγη τα οποία προσαρμόστηκαν με ειδικά clips κάτω από την επιφάνεια 7-10 φύλλων τριών φυτών. Τα θερμοζεύγη τοποθετήθηκαν κυρίως στα μεσαία φύλλα και η θερμοκρασία που κατέγραφε ο logger (ανά 10 min) αποτελούσε τον μέσο όρο των επιμέρους μετρήσεων.

3.3.2 Μετρήσεις κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση

Για την μέτρηση της κατανάλωσης της ενέργειας σε κάθε θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκαν θερμοζεύγη χαλκού - κοσταντάνης τα οποία ήταν κολλημένα στην εξωτερική πλευρά των σωλήνων θέρμανσης. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν ροόμετρα για να μετρηθεί η ροή του νερού όταν το σύστημα θέρμανσης ήταν σε λειτουργία. Οι μετρήσεις καταγράφονταν στον data logger ανά 10 min και συλλέγονταν με φορητό υπολογιστή με την βοήθεια του προγράμματος Acquire. Για την ενεργειακή αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

$$Q = m \text{ } Cp \text{ } DT/(600*160)$$

Το Q είναι η ενέργεια που αποδίδει το σύστημα θέρμανσης ανά 10λεπτο ανά m². Το Cp εκφράζει την ειδική θερμότητα του νερού, το m την ποσότητα του νερού

στο 10λεπτο και το DT την διαφορά της θερμοκρασίας του νερού στους σωλήνες εισόδου και επιστροφής.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο ολικός συντελεστής απωλειών θερμότητας του θερμοκηπίου από τον τύπο:

$$U=Q/\Delta T (in-out)*Ac/Ag \quad (W/m^2/^{\circ}C)$$

Q: Ενέργεια που αποδίδει το σύστημα (W)

ΔT : (in-out): Διαφορά θερμοκρασίας μέσα και έξω από το θερμοκήπιο ($^{\circ}C$)

Ac: επιφάνεια του καλύμματος οροφής (m^2)

Ag: επιφάνεια του εδάφους (m^2)

Για την ενεργειακή αξιολόγηση των τριών θερμοκηπίων γινόνταν επίσης καταγραφή της κατανάλωσης καυσίμων για θέρμανση με βαθμονομημένο λάστιχο συνδεδεμένο με την δεξαμενή των καυσίμων του κάθε θερμοκηπίου.

3.3.3 Υπολογισμός της ροής συμπύκνωσης των υδρατμών στο κάλυμμα

Η ροή των υδρατμών που συγκεντρώνονται στην εσωτερική πλευρά του πλαστικού καλύμματος μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$E_{cond} = gr * (xi - xrs)$$

xi : απόλυτη υγρασία του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου σε $kg\ m^{-3}$

xrs : απόλυτη υγρασία της επιφάνειας του καλύμματος στον κορεσμό $kg\ m^{-3}$

gr: αγωγιμότητα στη μεταφορά των υδρατμών πάνω στο κάλυμμα m/s

Στην περίπτωση που η σχέση παίρνει αρνητικές τιμές αυτό σημαίνει πως δεν υπάρχει υγροποίηση στο κάλυμμα. Συνεπώς συμπύκνωση στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος έχουμε μόνο όταν $xi > xrs$.

Η αγωγιμότητα στη μεταφορά των υδρατμών πάνω στο κάλυμμα υπολογίστηκε από την παρακάτω σχέση (Stanghellini και de Jong, 1995)

$$gr \approx Ac/Ag * 1.52 * 10^{-3} * (Ti - Tc)^{0.33} + 2 * 10^{-4}$$

Ac: επιφάνεια του καλύμματος m^2

Ag: επιφάνεια του εδάφους m^2

Ti: θερμοκρασία του αέρα στο μέσα στο θερμοκήπιο $^{\circ}C$

Tc: θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος $^{\circ}C$

3.3.4 Ανάπτυξη και παραγωγή καλλιέργειας

3.3.4.1 Μη καταστροφικές μετρήσεις

Για κάθε μεταχείριση (θερμοκήπιο) επιλέχθηκαν 8 φυτά, τα 4 από αυτά αποτελούσαν τα σταθερά πειραματικά φυτά κατά τη διάρκεια της περιόδου ενώ τα υπόλοιπα 4 ήταν κάθε φορά επιλεγμένα τυχαία για κάθε μέτρηση. Οι μετρήσεις γίνονταν κάθε 10-15 ημέρες και περιελάμβαναν τα εξής:

- Ανάπτυξη φυτών
- Ύψος φυτών
- Αριθμός φύλλων και ταξιανθιών
- Μήκος φύλλων και φυλλική επιφάνεια

Προκειμένου να βρεθεί η φυλλική επιφάνεια των φυτών έγιναν 2 μετρήσεις για κάθε μεταχείριση με την βοήθεια Scanner στις οποίες μετρήθηκε η επιφάνεια των φύλλων τριών φυτών με σκοπό να συσχετιστεί το μήκος των φύλλων με την φυλλική επιφάνεια. Προέκυψαν τρεις διαφορετικές σχέσεις (μία για κάθε μεταχείριση) της μορφής $y = a + b \cdot x$. Τα a και b εκφράζουν σταθερές και το x το μήκος των φύλλων. Η φυλλική επιφάνεια για κάθε φυτό υπολογίστηκε με βάση την παραπάνω σχέση, αθροίζοντας παράλληλα και τον αριθμό των φύλλων του φυτού για κάθε μέτρηση. Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) βρέθηκε πολλαπλασιάζοντας την φυλλική επιφάνεια ανά φυτό με την πυκνότητα φύτευσης της καλλιέργειας.

- Απόδοση καλλιέργειας
- Αριθμός των εμπορεύσιμων καρπών ανά συγκομιδή (στο σύνολο του θερμοκηπίου).
- Συνολικό βάρος των εμπορεύσιμων καρπών ανά συγκομιδή (στο σύνολο του θερμοκηπίου).

3.3.4.2 Καταστροφικές μετρήσεις

Για τις καταστροφικές μετρήσεις συλλέχθηκαν τρία φυτά για κάθε μεταχείριση και μετρήθηκε για κάθε ένα από αυτά το ύψος, η φυλλική τους επιφάνεια, το νωπό βάρος βλαστών και φύλλων και το ξηρό βάρος αυτών μετά από ξήρανση των φυτών σε φούρνο στους 80 °C για 48 h. Έγιναν συνολικά 4 καταστροφικές μετρήσεις (μία κάθε 30 ημέρες) κατά την διάρκεια του πειράματος.

3.3.5 Στατιστική ανάλυση

Η στατιστική ανάλυση έγινε με το πρόγραμμα SPSS Statistics version 19. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος General Linear Model –Repeated Measures με σκοπό να συγκριθούν οι μέσοι όροι των αγρονομικών μετρήσεων (ύψος, φυλλική επιφάνεια, αριθμός ανθοταξιών). Το επίπεδο σημαντικότητας ήταν $p < 0.05$. Υπολογίστηκε η στατιστική διαφορά που είχαν τα φυτά μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων και όχι μεταξύ τους.

4 Αποτελέσματα

4.1 Αξιολόγηση μικροκλίματος

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι μέσοι όροι ανά δεκαπενθήμερο για τις κλιματικές παραμέτρους της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια, καθώς και της θερμοκρασίας της καλλιέργειας. Επίσης παρουσιάζονται διαγράμματα και πίνακες της πορείας των τιμών των παραπάνω κλιματικών παραμέτρων για τέσσερις διαφορετικές περιόδους του πειράματος. Στις δύο από αυτές (7-9/3/13 και 20-21/3/13) το σύστημα θέρμανσης ήταν σε λειτουργία ενώ οι δύο επόμενες αφορούν ανοιξιάτικες και καλοκαιρινές ημέρες (7-9/5/13 και 29-31/5/13).

Μαζί με τους μέσους όρους του μικροκλίματος για την ανοιξιάτικη περίοδο, παρουσιάζονται επίσης και οι μέσοι όροι των παραμέτρων του μικροκλίματος για 2 10ήμερα της χειμερινής περιόδου όπου χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια πλαστικά καλύμματα και παρόμοιες καλλιεργητικές τεχνικές. Κατά την διάρκεια αυτών των ημερών το σύστημα της θέρμανσης βρίσκονταν σε λειτουργία και τα αποτελέσματα της ενεργειακής αξιολόγησης (4.3) μελετήθηκαν σύμφωνα με τις μετρήσεις αυτής της περιόδου.

Το θερμοκήπιο με το απλό κάλυμμα πολυαιθυλενίου χαρακτηρίζεται με τον όρο **Clear**, το θερμοκήπιο με το φύλλο διάχυσης ως **Diffuse** και αυτό με το διπλό φουσκωτό κάλυμμα ως **Double**.

4.1.1 Θερμοκρασία

Στον πίνακα 3 φαίνεται η μέση τιμή της θερμοκρασίας ημέρας σε κάθε θερμοκήπιο καθώς και έξω από αυτά. Παρατηρούμε πώς για κάθε περίοδο η μέση θερμοκρασία ημέρας μέσα στα θερμοκήπια κυμαίνεται μεταξύ 21,79 και 33,98 °C για όλη την καλλιεργητική περίοδο. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέση θερμοκρασία του Diffuse είναι χαμηλότερη από τα υπόλοιπα, ενώ το Double σε σχέση με τον Clear δεν διαφέρουν αισθητά. Η μέγιστη θερμοκρασία ημέρας παρατηρήθηκε στο Clear και ήταν 41,14 °C στις 25/6. Επίσης κατά την διάρκεια των ωρών 11:00 με 17:00 η διαφορά της θερμοκρασίας ήταν η μέγιστη με το Diffuse να διατηρεί χαμηλότερη θερμοκρασία κατά 1-2 °C σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Μέση θερμοκρασία ημέρας °C (08:00 - 20:00)				
	Clear	Diffuse	Double	Out
1-15 Μαρτίου	22,35	21,79	22,41	14,93
16-31 Μαρτίου	22,64	22,38	22,50	17,17
1-15 Απριλίου	24,63	23,69	24,49	19,49
16-30 Απριλίου	26,41	24,94	26,21	20,42
1-15 Μαΐου	27,55	26,32	28,02	22,76
15-31 Μαΐου	28,49	27,59	29,17	27,77
1-15 Ιουνίου	27,64	27,00	28,26	26,07
16-30 Ιουνίου	33,98	33,27	33,78	31,94

Πίνακας 3. Μέση τιμή θερμοκρασίας ημέρας ανά δεκαπενθήμερο.

Στον πίνακα 4 φαίνεται η μέση τιμή της θερμοκρασίας νύχτας για τα θερμοκήπια, με την θέρμανση να λειτουργεί μέχρι τα μέσα Απριλίου. Παρατηρούμε πώς μέχρι τα μέσα Απριλίου δεν υπάρχει διακύμανση της θερμοκρασίας λόγω της θέρμανσης, ενώ από εκείνο το σημείο και μετά το Double φαίνεται να είναι πιο ζεστό κατά 0,5-1,5 °C σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Μέση θερμοκρασία νύχτας °C (20:00 - 08:00)				
	Clear	Diffuse	Double	Out
1-15 Μαρτίου	13,26	13,80	13,67	10,96
16-31 Μαρτίου	15,49	15,68	15,83	13,61
1-15 Απριλίου	16,39	16,33	16,73	13,06
16-30 Απριλίου	17,12	16,42	17,04	13,59
1-15 Μαΐου	19,22	19,71	20,19	17,26
15-31 Μαΐου	21,33	21,24	22,30	21,84
1-15 Ιουνίου	20,54	20,92	21,63	20,51
16-30 Ιουνίου	25,17	25,30	25,95	25,61

Πίνακας 4. Μέση τιμή θερμοκρασίας νύχτας ανά δεκαπενθήμερο.

Παρακάτω παρουσιάζονται σε πίνακες οι μέσοι όροι της θερμοκρασίας αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για 2 δεκαήμερα της χειμερινής καλλιέργειας και όταν το σύστημα θέρμανσης ήταν σε λειτουργία.

Κατά την διάρκεια της μέρας το Diffuse είναι πιο κρύο κατά 1-1,5 °C σε σχέση με το Double και κατά 0,5-1 °C σε σχέση με το Clear. Κατά την διάρκεια της νύχτας δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές μεταξύ των τριών λόγω της λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης.

Μέση θερμοκρασία ημέρας ° C (08:00-17:00)				
	Clear	Diffuse	Double	Out
1 ^ο 10ημερο Δεκεμβρίου	16,21	14,89	16,44	7,42
1 ^ο 10ημερο Ιανουαρίου	15,77	15,09	16,53	10,24

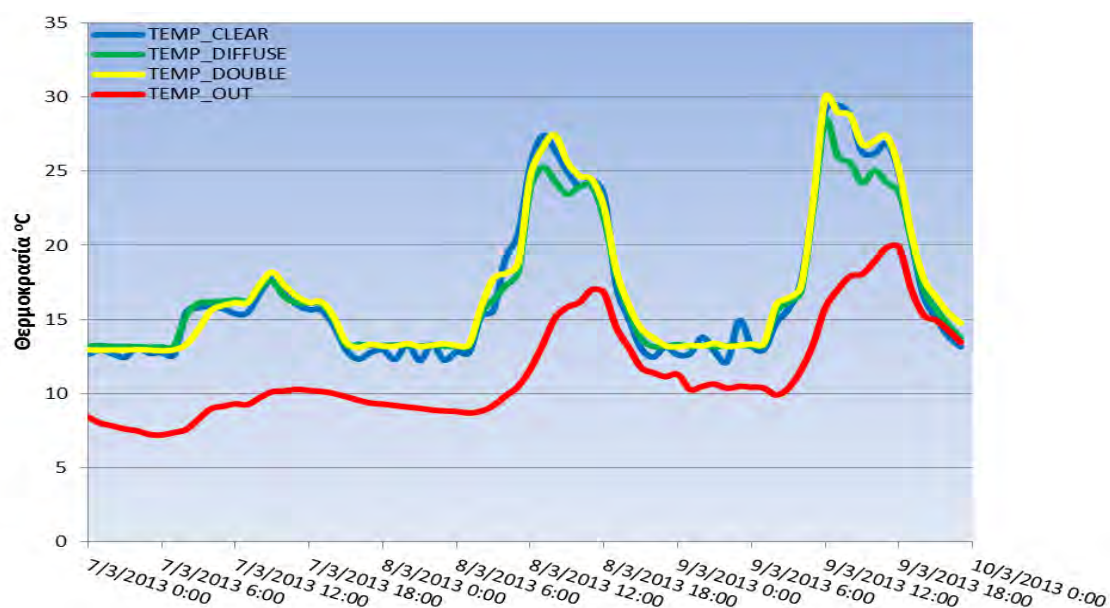
Πίνακας 5. Μέση τιμή θερμοκρασίας μέρας για 2 δεκαήμερα της χειμερινής περιόδου.

Μέση θερμοκρασία νύχτας ° C (17:00 – 08:00)				
	Clear	Diffuse	Double	Out
1 ^ο 10ημερο Δεκεμβρίου	12,14	11,55	12,39	4,79
1 ^ο 10ημερο Ιανουαρίου	12,28	12,29	12,77	8,66

Πίνακας 6. Μέση τιμή θερμοκρασίας νύχτας για 2 δεκαήμερα της χειμερινής περιόδου.

Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα ορισμένων χαρακτηριστικών ημερών όσον αφορά την διακύμανση της θερμοκρασίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια. Οι ίδιες ημέρες χρησιμοποιούνται για όλες τις κλιματικές μετρήσεις που έγιναν κατά την διάρκεια του πειράματος.

• 7/3/13-9/3/13 (με θέρμανση)



Διάγραμμα 1. Πορεία της θερμοκρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για την περίοδο 7-9/3/13.

Θερμοκρασία °C				
Πρωί (08:00 - 20:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
7/3/13	15,92±0.79	16,22±0.66	16,03±1.28	9,49±0.84
8/3/13	21,46±4,5	20,59±3,79	21,60±4,21	13,21±2,95
9/3/13	23,03±5,42	21,96±4,29	23,47±5,22	15,77±3,46

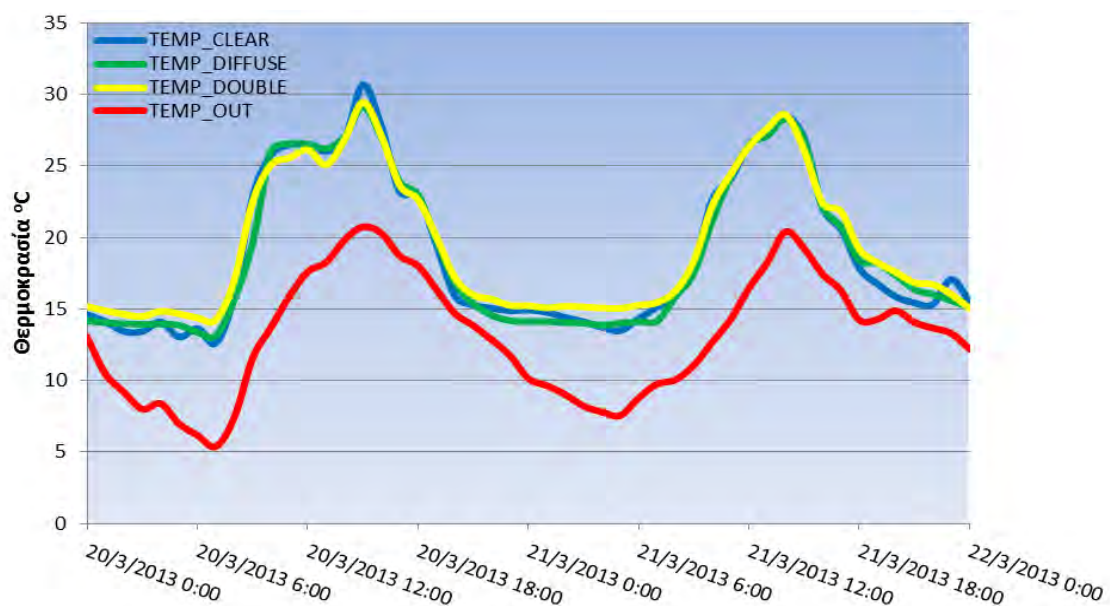
Πίνακας 7. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 7-9/3/13.

Θερμοκρασία °C				
Βράδυ (20:00 - 08:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
7-8/3/13	13,07±0.91	13,56±0.74	13,63±0.86	9,19±0.41
8-9/3/13	13,37±0.97	13,63±0.87	13,82±1.02	10,91±0.85

Πίνακας 8. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 7-9/3/13.

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρούμε πώς για τις ημέρες 8 και 9 Μαρτίου όπου έχουμε αρκετή ηλιοφάνεια, το Diffuse διατηρεί χαμηλότερη θερμοκρασία από τα υπόλοιπα κατά 1 °C, ενώ δεν παρατηρούνται διαφορές μεταξύ του Double και του Clear. Κατά την διάρκεια της νύχτας δεν παρατηρούνται διαφορές λόγω της θέρμανσης.

• 20/3/13-21/3/13 (με θέρμανση)



Διάγραμμα 2. Πορεία της θερμοκρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για την περίοδο 20-21/3/13.

Θερμοκρασία °C				
Πρωί (08:00 - 20:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
20/3/13	23,88±4,47	23,65±4,31	23,72±3,78	16,39±3,80
21/3/13	21,79±4,63	21,87±4,30	22,24±4,12	15,35±3,07

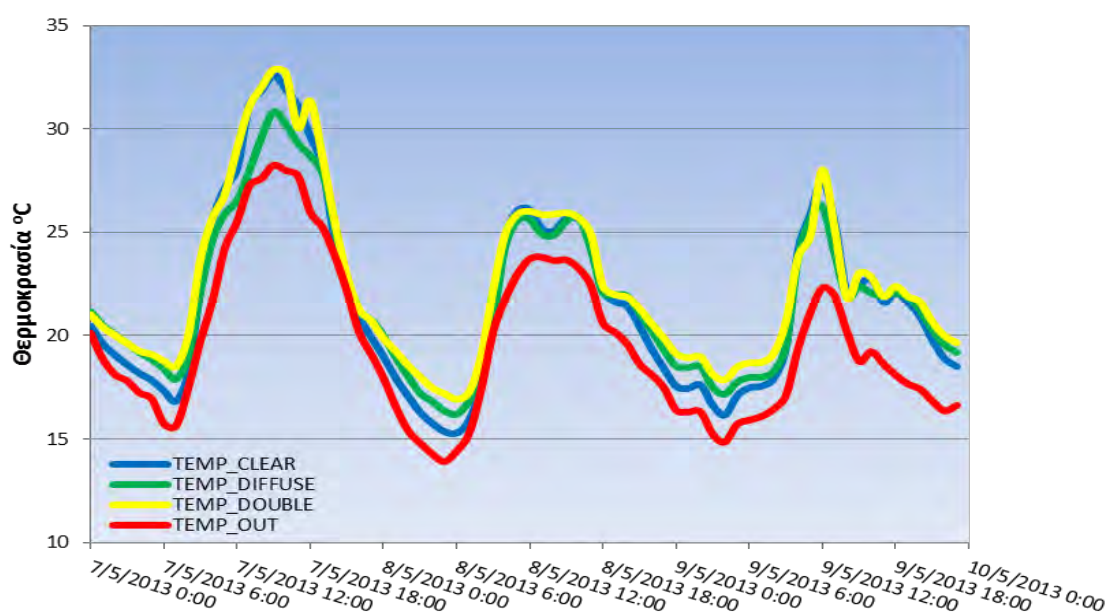
Πίνακας 9. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 20-21/3/13.

Θερμοκρασία °C				
Βράδυ (20:00 - 08:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
20-21/3/13	14,76±0,75	14,57±0,91	15,53±0,62	10,31±2,29

Πίνακας 10. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 20-21/3/13.

Σύμφωνα με τα παραπάνω τις πρωινές ώρες δεν παρατηρούνται διαφορές στην θερμοκρασία μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων, ενώ τις βραδινές ώρες το θερμοκήπιο Double διατηρεί 1 °C υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με τα υπόλοιπα.

• 7-9/5/13



Διάγραμμα 3. Πορεία της θερμοκρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για την περίοδο 7-9/5/13.

Θερμοκρασία °C				
Πρωί (08:00 - 20:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
7/5/13	27,88±4,27	26,77±3,39	28,42±3,88	24,81±3,37
8/5/13	23,64±2,58	23,52±2,31	24,04±2,28	21,78±2,03
9/5/13	22,60±2,61	22,36±2,18	22,85±2,23	19,10±1,84

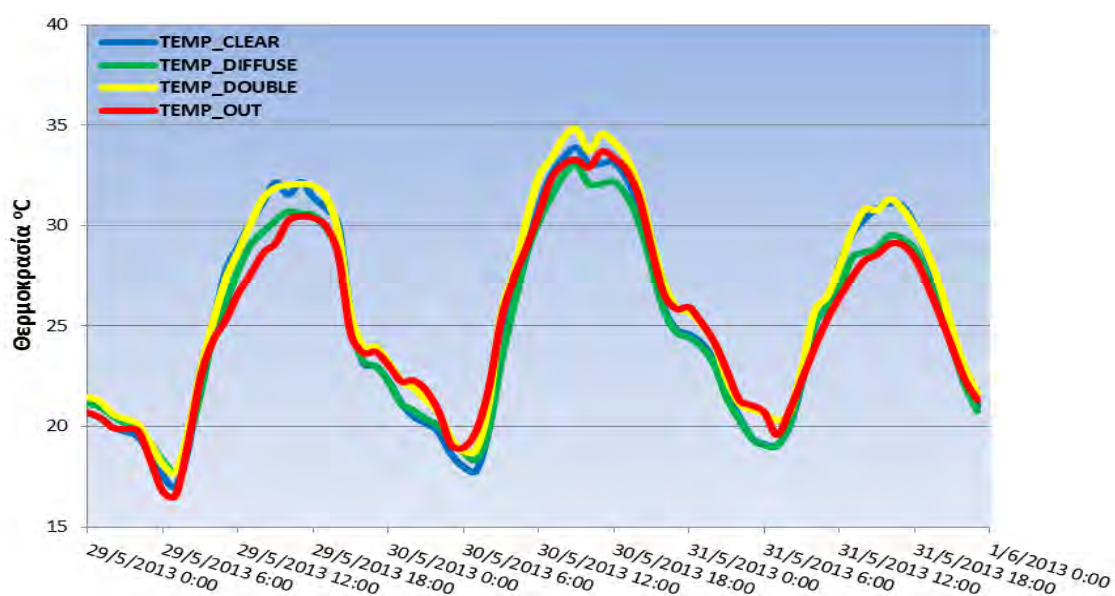
Πίνακας 11. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 7-9/5/13.

Θερμοκρασία °C				
Βράδυ (20:00 - 08:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
7-8/5/13	18,33±2,95	19,11±2,73	19,53±2,53	17,33±3,19
8-9/5/13	18,08±1,49	18,82±1,43	19,35±1,21	16,70±1,37

Πίνακας 12. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 7-9/5/13.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε πως το Diffuse την ημέρα με την υψηλότερη ηλιοφάνεια (7/5/13) διατηρεί χαμηλότερη θερμοκρασία κατά 1 με 1,5 °C σε σχέση με τα υπόλοιπα κατά την διάρκεια της μέρας. Κατά την διάρκεια της νύχτας το Double είναι πιο ζεστό κατά 1 °C περίπου σε σχέση με τα υπόλοιπα.

• 29-31/5/13



Διάγραμμα 4. Πορεία της θερμοκρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για την περίοδο 29-31/5/13.

Θερμοκρασία °C				
Πρωί (08:00 - 20:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
29/5/13	28,67±4,09	27,61±3,67	28,78±3,99	27,13±3,47
30/5/13	30,20±4,25	29,46±4,03	31,32±4,15	30,53±3,66
31/5/13	27,64±3,51	26,73±2,84	27,90±3,28	26,32±2,64

Πίνακας 13. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 29-31/5/13.

Θερμοκρασία °C				
Βράδυ (20:00 - 08:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
29-30/5/13	21,51±3,36	21,60±2,87	22,35±3,00	22,33±2,56
30-31/5/13	23,22±3,75	23,03±3,55	24,23±3,67	24,16±3,54

Πίνακας 14. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 29-31/5/13.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε πως το Diffuse τις πρωινές ώρες διατηρεί χαμηλότερη θερμοκρασία κατά 1 με 1,5 °C σε σχέση με τα υπόλοιπα. Κατά την διάρκεια της νύχτας το Double είναι πιο ζεστό κατά 1 °C περίπου σε σχέση με τα υπόλοιπα.

4.1.2 Σχετική υγρασία

Στον πίνακα 15 παρουσιάζεται η μέση σχετική υγρασία ημέρας των θερμοκηπίων και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Παρατηρούμε πως η σχετική υγρασία στο θερμοκήπιο της διάχυσης ήταν υψηλότερη κατά 5-10% σε σχέση με το Clear και κατά 10-20% σε σχέση με το Double. Η υψηλότερες τιμές παρατηρούνται στο δεύτερο δεκαπενθήμερο του Μαρτίου και στο πρώτο δεκαπενθήμερο του Μαΐου και για τις τρεις μεταχειρίσεις.

Μέση σχετική υγρασία ημέρας % (08:00 - 20:00)				
	Clear	Diffuse	Double	Out
1-15 Μαρτίου	60,32	61,18	52,43	65,93
16-31 Μαρτίου	75,91	80,64	71,24	73,36
1-15 Απριλίου	61,48	67,12	50,90	53,86
16-30 Απριλίου	61,63	71,34	50,12	51,55
1-15 Μαΐου	79,55	82,67	66,05	62,44
15-31 Μαΐου	65,09	71,35	48,61	37,40
1-15 Ιουνίου	71,97	79,92	55,64	49,73
16-30 Ιουνίου	56,89	66,08	55,37	41,97

Πίνακας 15. Μέση τιμή σχετικής υγρασίας ημέρας ανά δεκαπενθήμερο.

Σύμφωνα με τον πίνακα 16 η μέση σχετική υγρασία νύχτας στο Diffuse είναι επίσης υψηλότερη σε σχέση με το Double κατά 5-15% ενώ σε σχέση με το Clear οι διαφορές είναι πολύ μικρές. Και για τα τρία θερμοκήπια η μέση τιμή της σχετικής υγρασίας νύχτας ανά δεκαπενθήμερο κυμαίνεται μεταξύ 80 και 95 % με εξαίρεση το πρώτο δεκαπενθήμερο του Μαΐου και το δεύτερο δεκαπενθήμερο του Ιουνίου.

Μέση σχετική υγρασία νύχτας % (20:00 - 08:00)				
	Clear	Diffuse	Double	Out
1-15 Μαρτίου	89,18	90,94	87,56	74,53
16-31 Μαρτίου	94,86	96,58	96,30	78,77
1-15 Απριλίου	89,84	91,97	86,82	75,34
16-30 Απριλίου	91,45	94,56	88,81	76,59
1-15 Μαΐου	96,46	94,36	89,17	83,08
15-31 Μαΐου	71,20	72,32	59,55	54,40
1-15 Ιουνίου	83,56	85,55	76,68	70,80
16-30 Ιουνίου	72,73	76,13	70,25	60,06

Πίνακας 16. Μέση τιμή σχετικής υγρασίας νύχτας ανά δεκαπενθήμερο.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μέσοι όροι της σχετικής υγρασίας ημέρας και νύχτας για 2 δεκαήμερα της χειμερινής περιόδου.

Η μέση σχετική υγρασία κατά την διάρκεια της ημέρας είναι κοντά στον κορεσμό, ενώ δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των θερμοκηπίων (πίνακας 17).

Μέση σχετική υγρασία ημέρας % (08:00-17:00)				
	Clear	Diffuse	Double	Out
1 ^ο 10ημερο Δεκεμβρίου	95,43	96,28	95,90	76,25
1 ^ο 10ημερο Ιανουαρίου	98,51	99,93	99,80	95,34

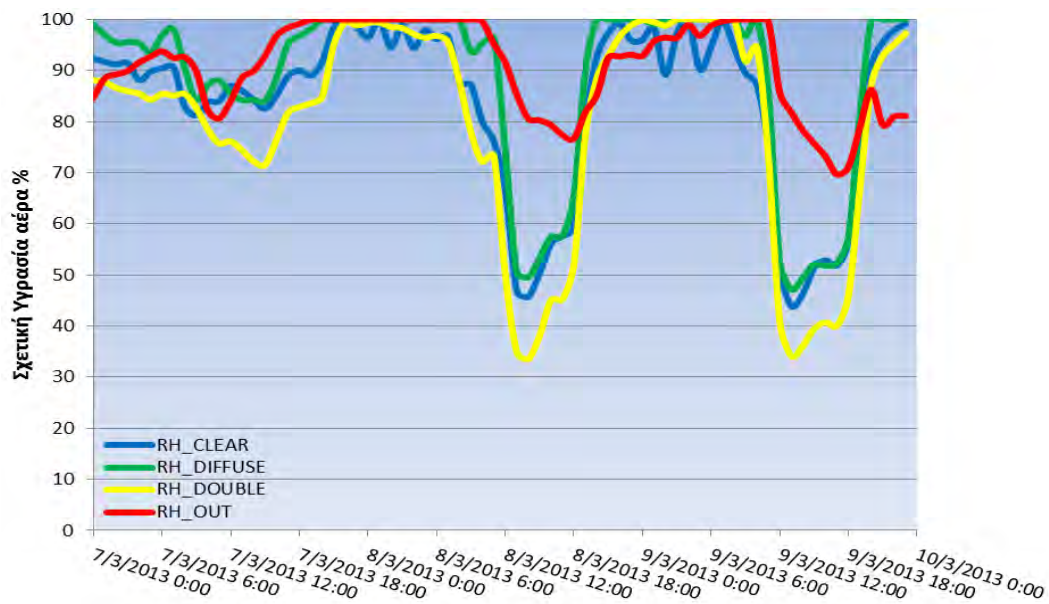
***Πίνακας 17.** Μέση τιμή σχετικής υγρασίας την ημέρα για 2 δεκαήμερα της χειμερινής περιόδου.*

Η μέση σχετική υγρασία κατά την διάρκεια της νύχτας (όπου και το σύστημα της θέρμανσης βρίσκονταν σε λειτουργία) δεν έχει μεγάλες διαφορές μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων εκτός από μια αύξηση του Double κατά 5 και 7% σε σχέση με το Clear και το Diffuse αντίστοιχα (πίνακας 18).

Μέση σχετική υγρασία νύχτας % (17:00-08:00)				
	Clear	Diffuse	Double	Out
1 ^ο 10ημερο Δεκεμβρίου	95,70	92,66	99,99	86,16
1 ^ο 10ημερο Ιανουαρίου	99,43	99,99	100,00	94,09

***Πίνακας 18.** Μέση τιμή σχετικής υγρασίας την νύχτα για 2 δεκαήμερα της χειμερινής περιόδου.*

• 7/3/13-9/3/13



Διάγραμμα 5. Πορεία της σχετικής υγρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για την περίοδο 7-9/3/13.

Σχετική υγρασία αέρα %				
Πρωί (08:00 - 20:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
7/3/13	85,90±3,22	89,75±5,83	78,94±4,84	91,94±6,78
8/3/13	68,17±16,58	75,7±20,62	59,71±20,28	87,16±8,93
9/3/13	66,46±18,99	71,27±22,62	60,84±25,43	84,63±11,66

Πίνακας 19. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της σχετικής υγρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 7-9/3/13.

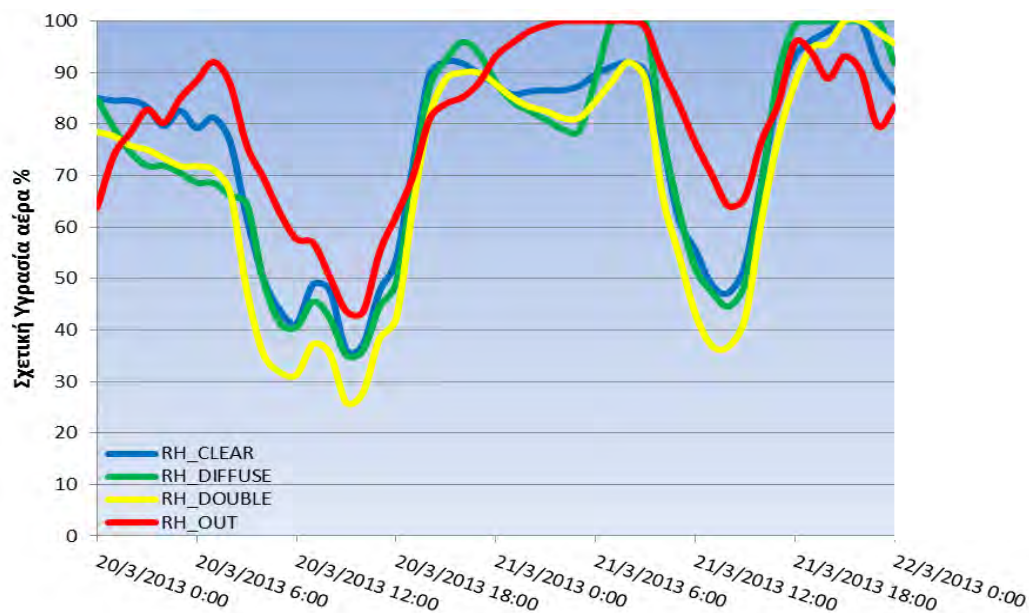
Σχετική υγρασία αέρα %				
Βράδυ (20:00 - 08:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
7-8/3/13	96,27±3,49	100,00±0	95,96±4,56	100,00±0
8-9/3/13	95,79±3,45	99,93±0,25	98,08±3,53	95,34±4,06

Πίνακας 20. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της σχετικής υγρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 7-9/3/13.

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρούμε πώς κατά την διάρκεια της μέρας, το Double διατηρεί χαμηλότερη σχετική υγρασία από τα υπόλοιπα ειδικότερα της μεσημεριανές ώρες, όπου γίνεται και ο αερισμός του θερμοκηπίου. Επίσης το Diffuse φαίνεται να έχει μεγαλύτερη σχετική υγρασία σε σχέση με τα υπόλοιπα αυτές τις

ώρες. Κατά τις βραδινές ώρες δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές μεταξύ των τριών.

• 20/3/13-22/3/13



Διάγραμμα 6. Πορεία της σχετικής υγρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για την περίοδο 20-21/3/13.

Σχετική υγρασία %				
Πρωί (08:00 - 20:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
20/3/13	54,29±16,17	51,58±15,40	43,48±16,94	62,75±13,63
21/3/13	74,35±19,31	76,28±23,00	67,56±23,08	83,76±12,28

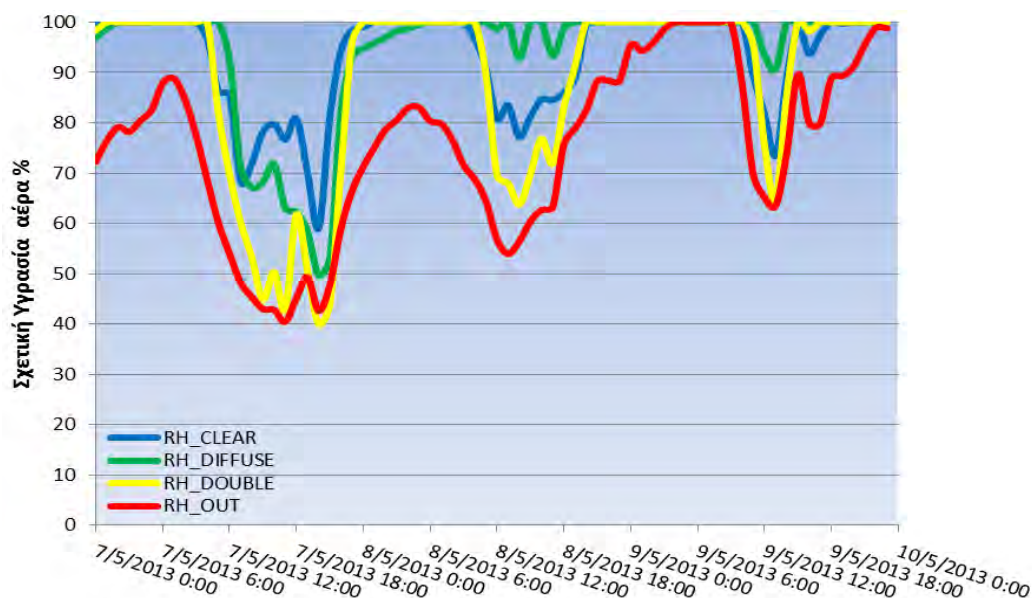
Πίνακας 21. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της Σχετικής υγρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 20-21/3/13.

Σχετική υγρασία %				
Βράδυ (20:00 - 08:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
20-21/3/13	88,92±2,35	88,56±7,44	85,83±3,80	94,17±7,14

Πίνακας 22. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της Σχετικής υγρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 20-21/3/13.

Σύμφωνα με τα παραπάνω τις πρωινές ώρες το θερμοκήπιο Double διατηρεί χαμηλότερη σχετική υγρασία κατά 10% σε σχέση με τα υπόλοιπα ενώ το βράδυ δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές.

• 7/5/13-9/5/13



Διάγραμμα 7. Πορεία της σχετικής υγρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για την περίοδο 7-9/5/13.

Σχετική υγρασία %				
Πρωί (08:00 - 20:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
7/5/13	81,04±12,54	77,22±18,47	65,79±22,55	53,99±14,46
8/5/13	88,74±7,93	98,73±2,57	83,39±14,06	67,08±9,31
9/5/13	94,14±8,50	98,78±3,00	93,81±11,44	82,98±12,10

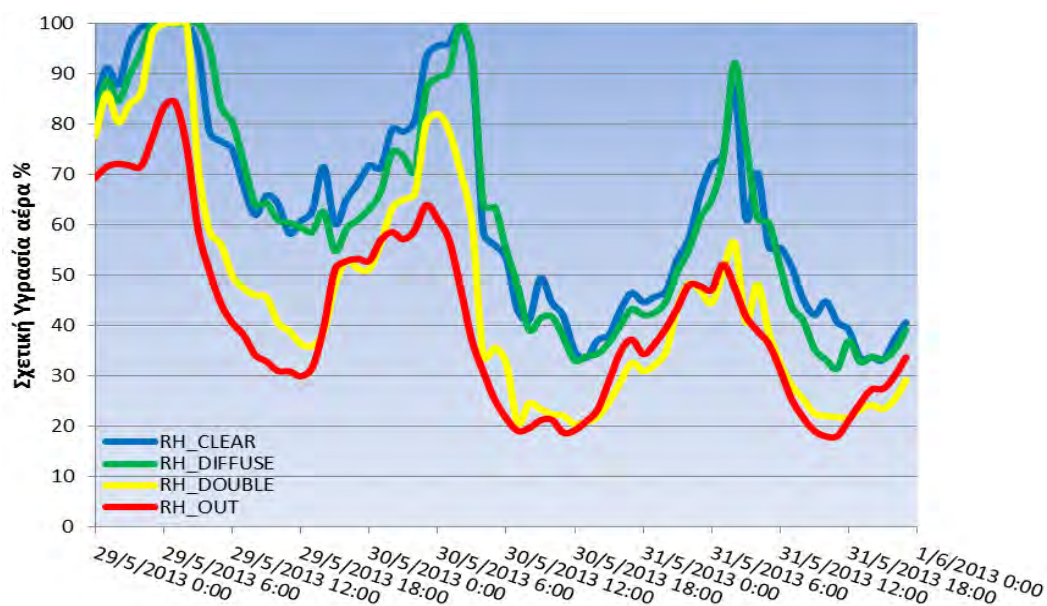
Πίνακας 23. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της Σχετικής υγρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 7-9/5/13.

Σχετική υγρασία %				
Βράδυ (20:00 - 08:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
7-8/5/13	94,76±11,94	89,38±17,56	88,51±22,20	71,10±13,40
8-9/5/13	99,9±0,17	100±0	100±0	94,76±5,97

Πίνακας 24. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της Σχετικής υγρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 7-9/5/13.

Κατά την διάρκεια της πρώτης ημέρας που έχει και την μεγαλύτερη ηλιοφάνεια, το Double διατηρεί χαμηλότερη σχετική υγρασία κατά 10-15% σε σχέση με τα υπόλοιπα. Τις υπόλοιπες μέρες, με χαμηλότερη ηλιοφάνεια το Double έχει χαμηλότερη σχετική υγρασία αλλά σε μικρότερο ποσοστό. Κατά την διάρκεια της νύχτας δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές.

• 29/5/13-31/5/13



Διάγραμμα 8. Πορεία της σχετικής υγρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για την περίοδο 29-31/5/13.

Σχετική υγρασία %				
Πρωί (08:00 - 20:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
29/5/13	72,12±12,89	73,99±15,96	51,23±17,89	41,42±13,46
30/5/13	52,72±20,81	52,72±22,24	31,44±16,07	25,01±8,53
31/5/13	50,80±15,32	48,48±19,08	31,18±11,38	28,52±9,80

Πίνακας 25. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της Σχετικής υγρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 29-31/5/13.

Σχετική υγρασία %				
Βράδυ (20:00 - 08:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
29-30/5/13	79,30±13,00	73,30±14,19	61,86±13,52	54,64±6,31
30-31/5/13	54,73±15,49	52,42±16,66	38,16±10,78	40,00±8,53

Πίνακας 26. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της Σχετικής υγρασίας του αέρα μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 29-31/5/13.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε πως το Double διατηρεί χαμηλότερη σχετική υγρασία κατά 20 % σε σχέση με τα υπόλοιπα κατά τις πρωινές ώρες. Τις βραδινές ώρες το Double έχει επίσης χαμηλότερη σχετική υγρασία κατά 10-15%.

4.1.3 Ηλιακή ακτινοβολία

Όσον αφορά την μέση ηλιακή ακτινοβολία το Clear είχε την μεγαλύτερη διαπερατότητα σε όλη την διάρκεια του πειράματος ακόμα και μετά από την εγκατάσταση διχτύων σκίασης πάνω από τα πλαστικά καλύμματα των θερμοκηπίων στις 15/5/13. Πιο συγκεκριμένα το Clear είχε υψηλότερη διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία κατά 10 και 20% σε σχέση με το Double και το Diffuse αντίστοιχα (πίνακας 27). Στις ηλιόλουστες ημέρες με την εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία να φτάνει τα 900W/m² η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία έφτανε τα 700 W/m² για το Clear, τα 550 W/m² για το Diffuse και τα 600 W/m² για το Double. Οι τιμές της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας μετά την εγκατάσταση των διχτύων δεν ξεπερνούσαν τα 650 W/m² για το Clear, τα 500 W/m² για το Diffuse και τα 600 W/m² για το Double, όταν η εξωτερική ακτινοβολία έφτανε μέχρι και τα 1000 W/m² τις μεσημεριανές ώρες. Σε μέσους όρους, στο Clear εισέρχονταν 15-30% περισσότερη ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με το Diffuse και 5-15% σε σχέση με το Double. Το πλεόνασμα της ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία αυξάνονταν περισσότερο τις ημέρες με καθαρό ουρανό και με μεγάλη ένταση ακτινοβολίας.

Μέση ηλιακή ακτινοβολία W/m² (08:00 - 20:00)				
	Clear	Diffuse	Double	Out
1-15 Μαρτίου	208,69	159,98	179,20	267,96
16-31 Μαρτίου	286,59	224,10	256,29	375,87
1-15 Απριλίου	328,64	291,27	317,68	543,96
16-30 Απριλίου	342,83	315,79	343,89	493,21
1-15 Μαΐου	329,51	278,82	313,89	467,46
15-31 Μαΐου	307,62	250,99	283,67	531,29
1-15 Ιουνίου	276,36	196,89	243,30	465,38
16-30 Ιουνίου	330,04	263,48	299,47	539,80

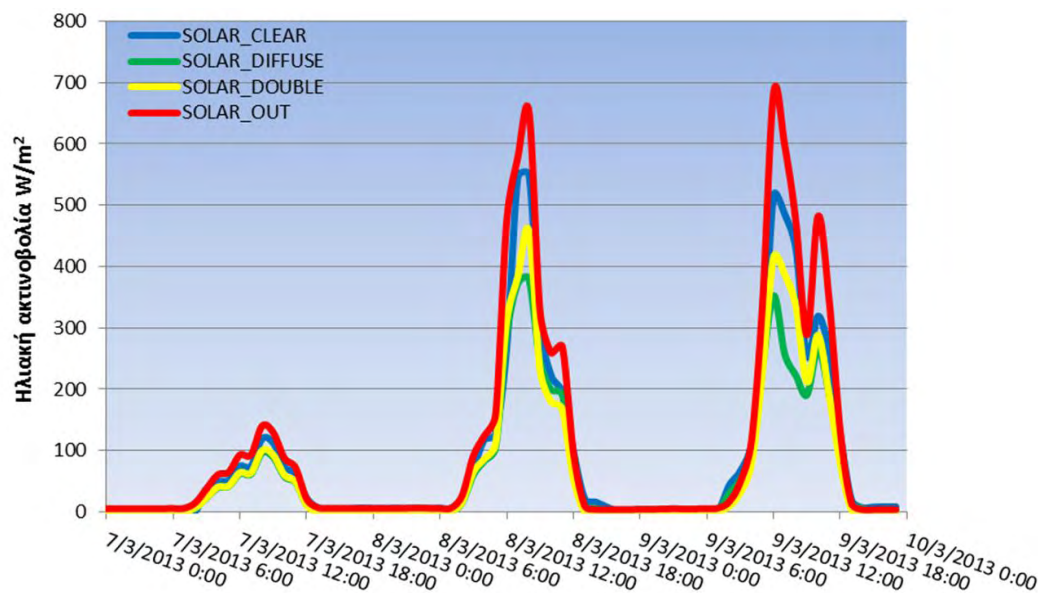
***Πίνακας 27.** Μέση ηλιακή ακτινοβολία ανά δεκαπενθήμερο.*

Η μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας για τα 2 δεκαήμερα της χειμερινής περιόδου παρουσιάζεται στον πίνακα 28. Παρατηρούμε πως το Clear είχε υψηλότερη διαπερατότητα στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία κατά 30% και κατά 20% σε σχέση με το Diffuse και το Double αντίστοιχα.

Μέση ηλιακή ακτινοβολία W/m² (08:00 – 17:00)				
	Clear	Diffuse	Double	Out
1 ^ο 10ημερο Δεκεμβρίου	110,45	79,67	89,94	185,86
1 ^ο 10ημερο Ιανουαρίου	98,20	75,40	76,27	134,99

***Πίνακας 28.** Μέση ηλιακή ακτινοβολία για 2 δεκαήμερα της χειμερινής περιόδου.*

• 7/3/13-9/3/13



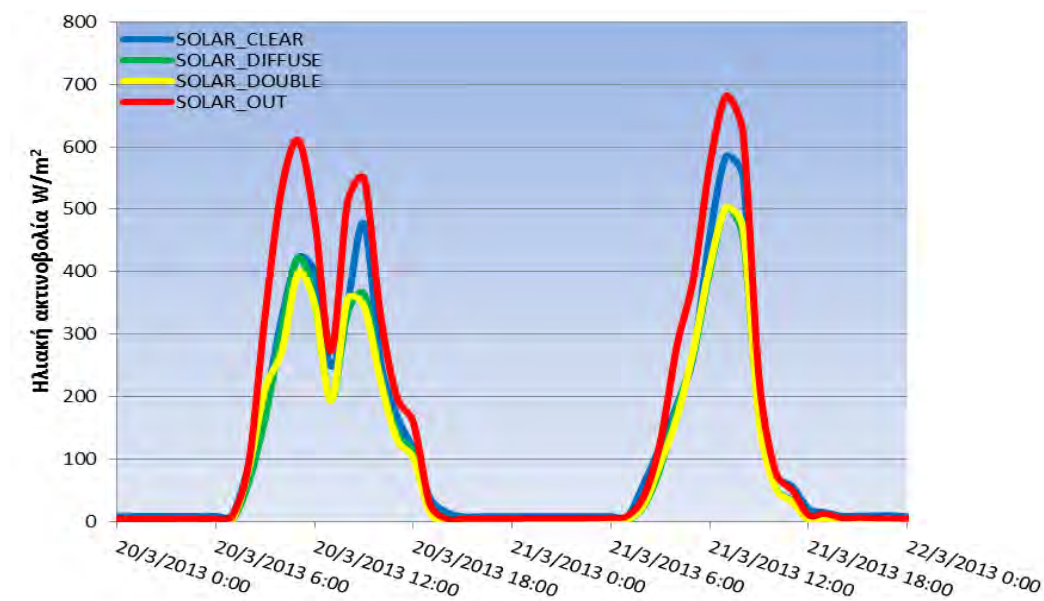
Διάγραμμα 9. Πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για την περίοδο 7-9/3/13.

Ηλιακή ακτινοβολία W/m ²				
Πρωί (08:00 - 20:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
7/3/13	53,36±38.24	41,65±31.76	42,91±33.23	63,76±44.66
8/3/13	196,70±181,23	156,81±132,76	159,00±148,9	236,50±216,8
9/3/13	220,91±177,06	154,27±112,33	173,85±150,56	272,10±235,99

Πίνακας 29. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 7-9/3/13.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε πως τις μέρες με έντονη ηλιοφάνεια το Diffuse έχει την χαμηλότερη περατότητα σε ποσοστό 30% σε σχέση με το Clear, ενώ το Double έχει χαμηλότερη περατότητα κατά 20% σε σχέση με το Clear. Την ημέρα με χαμηλή ηλιοφάνεια το πλεόνασμα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας περιορίζεται στο 10% για το θερμοκήπιο Clear.

• 20/3/13-21/3/13



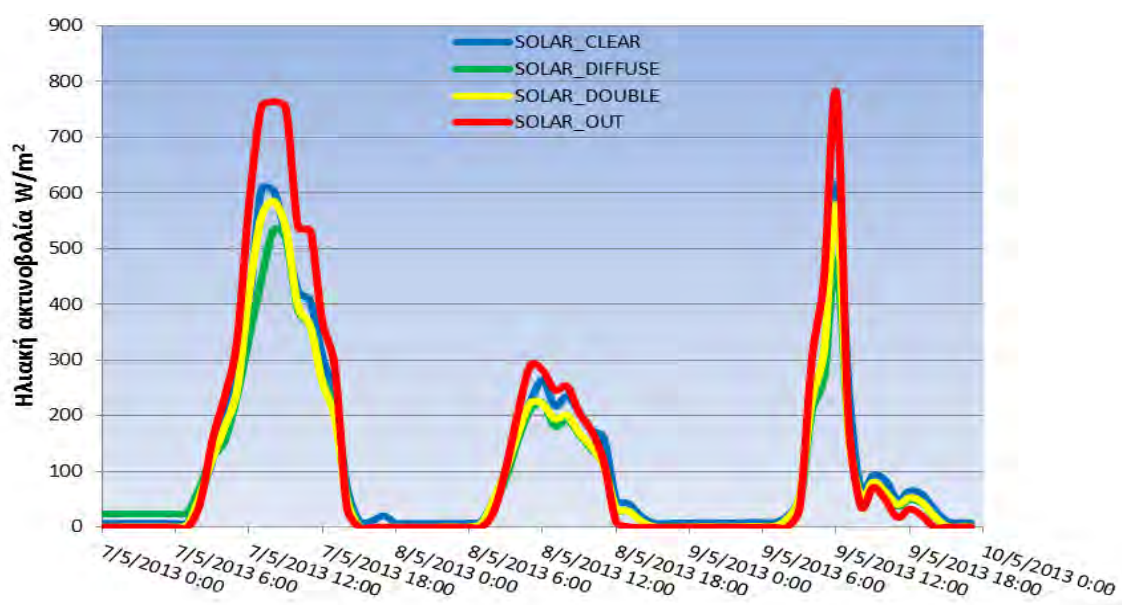
Διάγραμμα 10. Πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για την περίοδο 20-21/3/13.

Ηλιακή ακτινοβολία W/m ²				
Πρωί (08:00 - 20:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
20/3/13	238,07±150,49	208,50±138,14	206,33±134,11	315,85±209,36
21/3/13	199,05±206,16	167,93±182,95	169,09±185,98	238,39±250,18

Πίνακας 30. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 20-21/3/13.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε πως το Clear έχει 15% μεγαλύτερη περατότητα στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με τα υπόλοιπα, ενώ δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ του Double και του Diffuse.

• 7/5/13-9/5/13



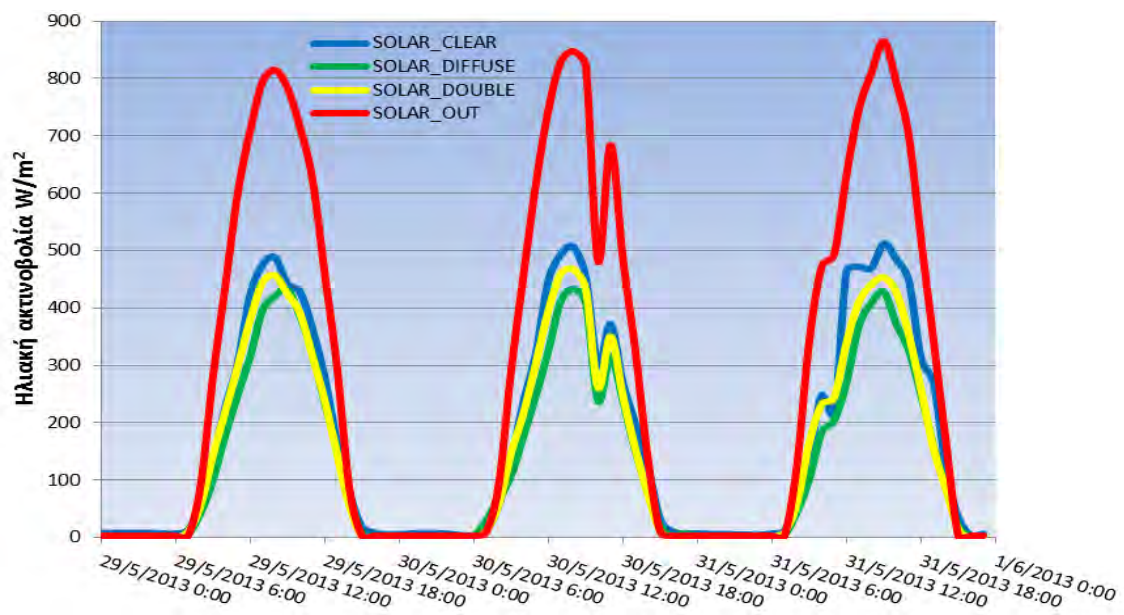
Διάγραμμα 11. Πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για την περίοδο 7-9/5/13.

Ηλιακή ακτινοβολία W/m ²				
Πρωί (08:00 - 20:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
7/5/13	326,32±186,73	286,00±160,24	305,00±185,75	413,41±260,53
8/5/13	147,40±84,41	121,94±74,43	127,28±76,45	147,27±110,20
9/5/13	148,05±167,90	117,59±134,67	131,81±160,93	152,39±231,80

Πίνακας 31. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 7-9/5/13.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε πως στο Diffuse εισέρχεται λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία κατά 15-20% σε σχέση με το Clear και κατά 5-10% σε σχέση με Double.

• 29/5/13-31/5/13



Διάγραμμα 12. Πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για την περίοδο 29-31/5/13.

Ηλιακή ακτινοβολία W/m ²				
Πρωί (08:00 - 20:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
29/5/13	297,19±153,73	253,49±136,93	274,45±143,61	514,45±261,38
30/5/13	301,10±148,35	246,35±127,31	274,68±141,58	524,32±259,68
31/5/13	324,02±159,88	246,04±128,77	278,60±136,59	539,11±244,35

Πίνακας 32. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 29-31/5/13.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε πως στο Diffuse εισέρχεται λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία κατά 15-25% σε σχέση με το Clear και κατά 8-11% σε σχέση με το Double. Επίσης το Double έχει χαμηλότερη περατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία κατά 8-14% σε σχέση με το Clear. Η μεγάλη διαφορά της εξωτερικής ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την εσωτερική οφείλεται στην σκίαση των θερμοκηπίων από τα δίχτυα τα οποία εγκαταστάθηκαν πάνω από τα καλύμματα από τα μέσα Μαΐου και μέχρι το τέλος της καλλιέργειας.

4.1.4 Θερμοκρασία καλλιέργειας

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται η μέση θερμοκρασία καλλιέργειας την ημέρα και την νύχτα για τις τρεις μεταχειρίσεις. Η θερμοκρασία των φύλλων της καλλιέργειας την ημέρα βρέθηκε υψηλότερη στο Double με μικρή διαφορά από το Clear, ενώ η καλλιέργεια στο Diffuse διατηρούσε χαμηλότερη θερμοκρασία κατά 0,5-1 °C από τα υπόλοιπα κυρίως μετά το τέλος Μαρτίου. Κατά την διάρκεια της νύχτας η θερμοκρασία καλλιέργειας στο Clear ήταν η χαμηλότερη κατά 0,5-1,5 °C σε σχέση με τα υπόλοιπα.

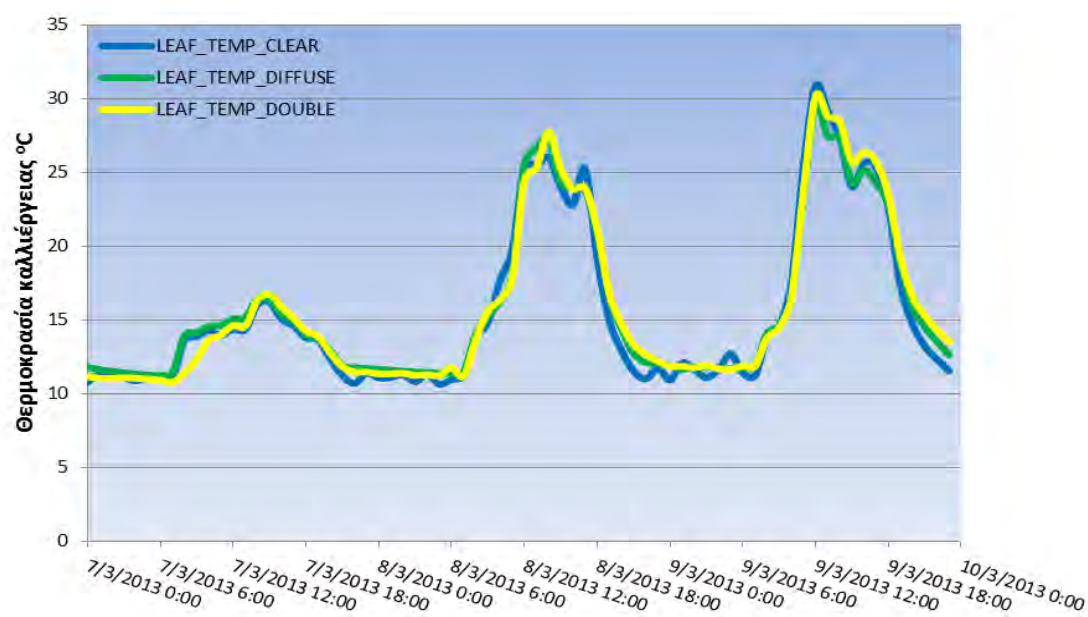
Θερμοκρασία καλλιέργειας την ημέρα °C (08:00 - 20:00)			
	Clear	Diffuse	Double
1-15 Μαρτίου	21,62	21,53	21,39
16-31 Μαρτίου	21,37	21,39	20,96
1-15 Απριλίου	22,47	21,77	22,72
16-30 Απριλίου	23,26	23,00	24,23
1-15 Μαΐου	24,23	24,02	25,02
15-31 Μαΐου	25,86	24,67	25,90
1-15 Ιουνίου	25,48	25,32	25,88
16-30 Ιουνίου	31,25	30,83	31,31

Πίνακας 33. Μέση θερμοκρασία καλλιέργειας την ημέρα ανά δεκαπενθήμερο.

Θερμοκρασία καλλιέργειας την νύχτα °C (20:00 - 08:00)			
	Clear	Diffuse	Double
1-15 Μαρτίου	11,96	12,58	12,65
16-31 Μαρτίου	13,56	14,17	13,43
1-15 Απριλίου	14,36	14,53	15,00
16-30 Απριλίου	16,25	17,37	17,53
1-15 Μαΐου	16,55	17,68	17,81
15-31 Μαΐου	18,27	19,42	19,12
1-15 Ιουνίου	18,39	19,92	19,64
16-30 Ιουνίου	22,32	23,92	23,13

Πίνακας 34. Μέση θερμοκρασία καλλιέργειας την νύχτα ανά δεκαπενθήμερο.

• 7/3/13-9/3/13



Διάγραμμα 13. Πορεία της θερμοκρασίας της καλλιέργειας για την περίοδο 7-9/3/13.

Θερμοκρασία καλλιέργειας ° C			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7/3/13	14,32±1,02	14,72±1,01	14,26±1,54
8/3/13	20,16±4,93	20,54±4,93	20,51±4,82
9/3/13	22,18±5,87	21,89±5,28	22,53±5,73

Πίνακας 35. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας της καλλιέργειας κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 7-9/3/13.

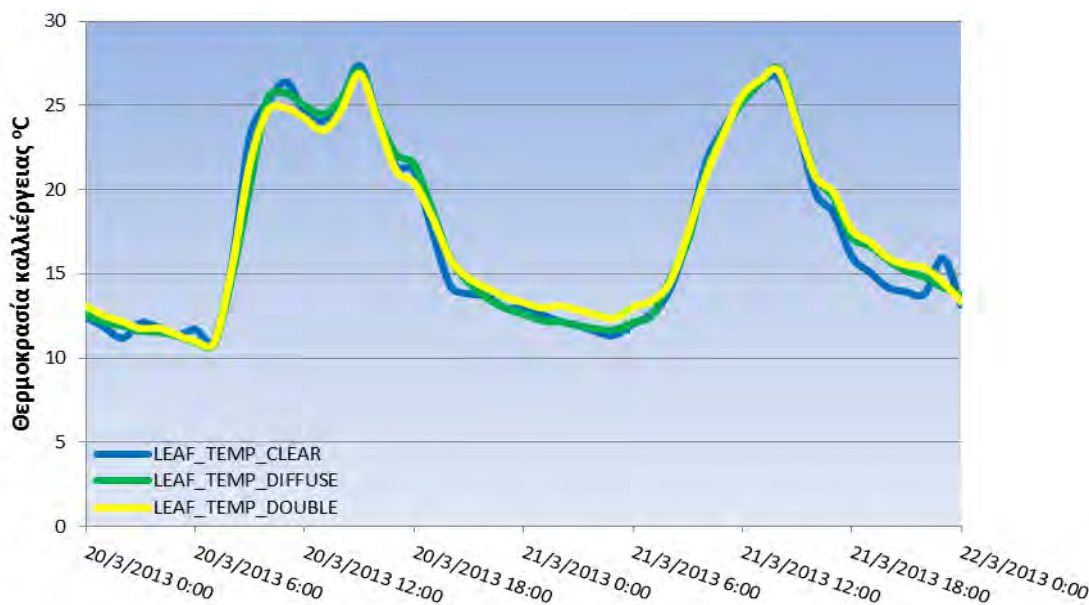
Θερμοκρασία καλλιέργειας ° C			
Βράδυ (20:00 - 07:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7-8/3/13	11,18±0,44	11,69±0,41	11,53±0,44
8-9/3/13	11,67±0,63	12,13±0,77	12,28±0,90

Πίνακας 36. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας της καλλιέργειας κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 7-9/3/13.

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές μεταξύ των θερμοκηπίων για τις πρώτες δύο ημέρες αλλά για την ημέρα (9/3) όπου και υπάρχει μεγαλύτερη ηλιοφάνεια, η καλλιέργεια στο Diffuse διατηρεί 0,7 °C χαμηλότερη

θερμοκρασία από τα υπόλοιπα. Κατά την διάρκεια της νύχτας η καλλιέργεια στο Clear διατηρεί χαμηλότερη θερμοκρασία κατά 0,5 °C σε σχέση με τα υπόλοιπα.

• 20/3/13-21/3/13



Διάγραμμα 14. Πορεία της θερμοκρασίας της καλλιέργειας για την περίοδο 20-21/3/13.

Θερμοκρασία καλλιέργειας ° C			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
20/3/13	22,32±4,16	22,36±3,92	21,97±3,63
21/3/13	20,18±4,67	20,68±4,27	20,78±4,21

Πίνακας 37. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας της καλλιέργειας κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 20-21/3/13.

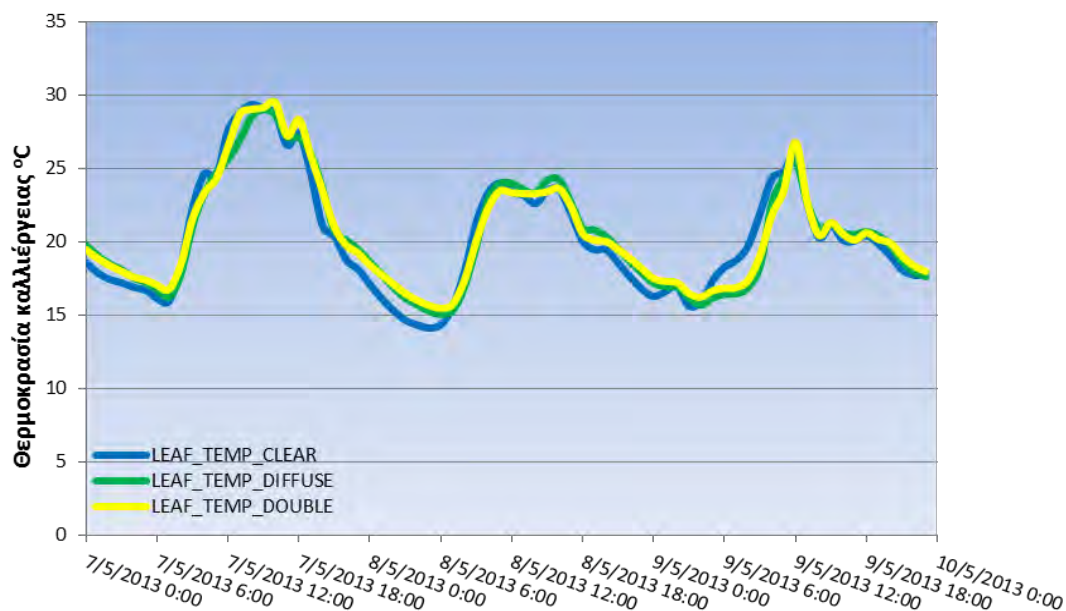
Θερμοκρασία καλλιέργειας ° C			
Βράδυ (20:00 - 07:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
20-21/3/13	12,77±0,95	12,96±1,29	13,56±0,97

Πίνακας 38. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας της καλλιέργειας κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 20-21/3/13.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η θερμοκρασία των φύλλων της καλλιέργειας δεν παρουσιάζει διαφορές τις πρωινές ώρες, ενώ κατά την διάρκεια της νύχτας η

καλλιέργεια στο Double έχει 0,5 και 1 °C υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με το Diffuse και το Clear αντίστοιχα.

• 7/5/13-9/5/13



Διάγραμμα 15. Πορεία της θερμοκρασίας της καλλιέργειας για την περίοδο 7-9/5/13.

Θερμοκρασία καλλιέργειας °C			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7/5/13	25,61±3,42	25,33±3,25	25,79±3,39
8/5/13	21,81±1,97	22,11±2,21	21,78±1,96
9/5/13	21,25±1,97	21,11±2,29	21,09±2,29

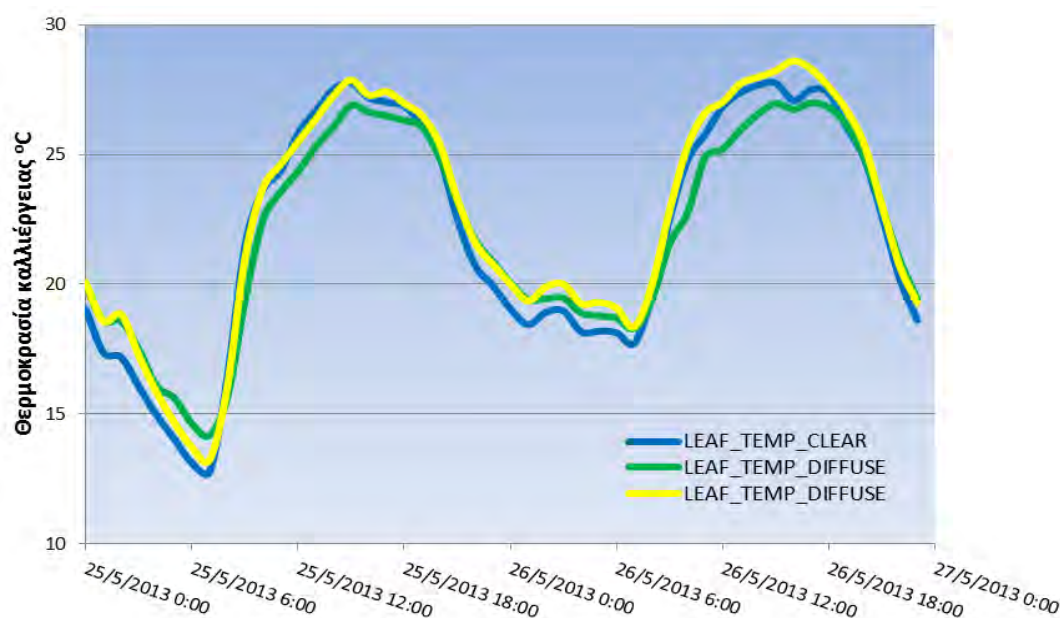
Πίνακας 39. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας της καλλιέργειας κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 7-9/5/13.

Θερμοκρασία καλλιέργειας °C			
Βράδυ (20:00 - 07:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7-8/5/13	16,75±2,51	18,12±2,66	18,21±2,48
8-9/5/13	16,91±1,18	17,44±1,39	17,70±1,26

Πίνακας 40. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας της καλλιέργειας κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 7-9/5/13.

Σύμφωνα με τα παραπάνω κατά τις πρωινές ώρες δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές, ενώ κατά την διάρκεια της νύχτας η καλλιέργεια στο Clear διατηρεί χαμηλότερη θερμοκρασία κατά 0,5 – 1,5 °C σε σχέση με τα υπόλοιπα.

• 25/5/13-26/5/13



Διάγραμμα 16. Πορεία της θερμοκρασίας της καλλιέργειας για την περίοδο 25-26/5/13.

Θερμοκρασία καλλιέργειας °C			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
25/5/13	25,05±3,15	24,15±3,30	25,07±3,30
26/5/13	25,78±2,40	24,99±2,35	26,32±2,48

Πίνακας 41. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας της καλλιέργειας κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 25-26/5/13.

Θερμοκρασία καλλιέργειας °C			
Βράδυ (20:00 - 07:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
25-26/5/13	19,64±2,05	20,24±1,95	20,48±1,93

Πίνακας 42. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της θερμοκρασίας της καλλιέργειας κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 25-26/5/13.

Το διάγραμμα 16 παρουσιάζει την πορεία των τιμών της θερμοκρασίας καλλιέργειας για την περίοδο 25-26/5/13 και όχι για την περίοδο 29-31/5/13 που μελετήθηκε στις παραπάνω ενότητες. Η αντικατάσταση έγινε λόγω απώλειας δεδομένων (για την θερμοκρασία καλλιέργειας) της περιόδου 29-31/5/13. Θα πρέπει να σημειωθεί πως κατά την περίοδο 25-26/5/13 επικρατούσαν παρόμοιες κλιματικές συνθήκες με την περίοδο 29-31/5/13 γι' αυτό και επιλέχθηκε το εν λόγω διάγραμμα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω κατά τις πρωινές ώρες παρατηρείται χαμηλότερη θερμοκρασία καλλιέργειας στο Diffuse κατά 1-1,5 °C σε σχέση με τα υπόλοιπα. Κατά την διάρκεια της νύχτας στο Clear η καλλιέργεια διατηρεί χαμηλότερη θερμοκρασία κατά 0,5-1 °C σε σχέση με τα υπόλοιπα.

4.1.5 Έλλειμμα κορεσμού του αέρα

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται η μέση τιμή του ελλείμματος κορεσμού του αέρα μέσα στα θερμοκήπια. Το έλλειμμα κορεσμού εκφράζει καλύτερα την υδατική κατάσταση του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο καθώς συνυπολογίζει την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία του χώρου ενώ εκφράζει την ποσότητα των υδρατμών που μπορούν να προστεθούν στο θερμοκήπιο μέχρι τον κορεσμό.

Το έλλειμμα κορεσμού βρέθηκε να είναι υψηλότερο στο θερμοκήπιο Double για όλη την καλλιεργητική περίοδο κατά 0,5-1 kPa σε σχέση με τα υπόλοιπα κατά την διάρκεια της μέρας. Το θερμοκήπιο Diffuse είχε το χαμηλότερο έλλειμμα κορεσμού με διαφορά από το Clear κατά 0,2-0,5 kPa. Κατά την διάρκεια της νύχτας δεν βρέθηκαν μεγάλες διαφορές, με τα θερμοκήπια να βρίσκονται κοντά στον κορεσμό σε υδρατμούς κυρίως μέχρι τα μέσα Μαΐου.

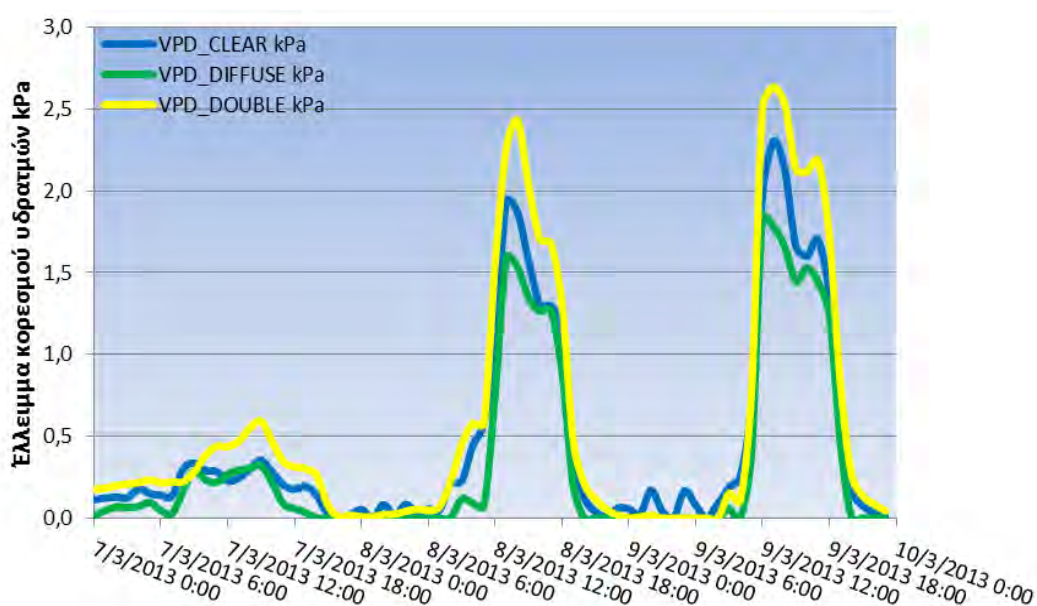
Έλλειμμα κορεσμού του αέρα την ημέρα (kPa) (08:00 - 20:00)			
	Clear	Diffuse	Double
1-15 Μαρτίου	1,25	1,16	1,49
16-31 Μαρτίου	0,74	0,62	0,87
1-15 Απριλίου	1,35	1,14	1,70
16-30 Απριλίου	1,44	1,05	1,93
1-15 Μαΐου	0,78	0,42	1,04
15-31 Μαΐου	1,50	1,15	2,28
1-15 Ιουνίου	1,16	0,81	1,70
16-30 Ιουνίου	2,49	1,87	2,61

Πίνακας 43. Μέση τιμή του ελλείμματος κορεσμού του αέρα κατά την διάρκεια της μέρας ανά δεκαπενθήμερο.

Έλλειμμα κορεσμού του αέρα την νύχτα (kPa) (08:00 - 20:00)			
	Clear	Diffuse	Double
1-15 Μαρτίου	0,17	0,14	0,20
16-31 Μαρτίου	0,09	0,06	0,07
1-15 Απριλίου	0,21	0,16	0,29
16-30 Απριλίου	0,20	0,14	0,30
1-15 Μαΐου	0,10	0,08	0,18
15-31 Μαΐου	0,83	0,77	1,21
1-15 Ιουνίου	0,47	0,42	0,69
16-30 Ιουνίου	1,04	0,80	1,07

Πίνακας 44. Μέση τιμή του ελλείμματος κορεσμού του αέρα κατά την διάρκεια της νύχτας ανά δεκαπενθήμερο.

• 7/3/13-9/3/13



Διάγραμμα 17. Πορεία του ελλείμματος κορεσμού των υδρατμών του αέρα για την περίοδο 7-9/3/13.

Έλλειμμα κορεσμού υδρατμών kPa			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7/3/13	0,25±0,06	0,19±0,11	0,39±0,11
8/3/13	0,94±0,62	0,70±0,62	1,19±0,77
9/3/13	1,14±0,79	0,91±0,73	1,38±1,00

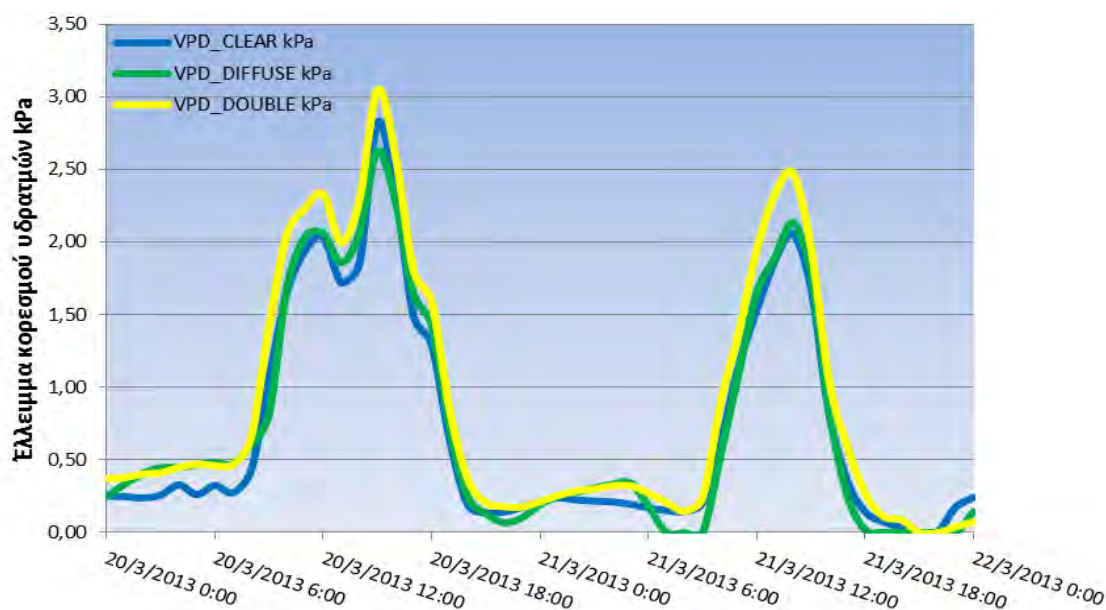
Πίνακας 45. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του ελλείμματος κορεσμού του αέρα κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 7-9/3/13.

Έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa)			
Βράδυ (20:00 - 08:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7-8/3/13	0,06±0,06	0,00±0,00	0,07±0,08
8-9/3/13	0,07±0,06	0,00±0,00	0,03±0,06

Πίνακας 46. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του ελλείμματος κορεσμού του κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 7-9/3/13.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι κατά την διάρκεια της μέρας το Double παρουσιάζει μεγαλύτερο έλλειμμα κορεσμού κατά 0,2 και 0,5 kPa σε σχέση με το Clear και το Diffuse αντίστοιχα. Την νύχτα δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές.

• 20/3/13-21/3/13



Διάγραμμα 18. Πορεία του ελλείμματος κορεσμού των θερμοκηπίων για την περίοδο 20-21/3/13.

Έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa)			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
20-/3/13	1,50±0,76	1,54±0,73	1,79±0,79
21/3/13	0,82±0,75	0,79±0,83	1,04±0,89

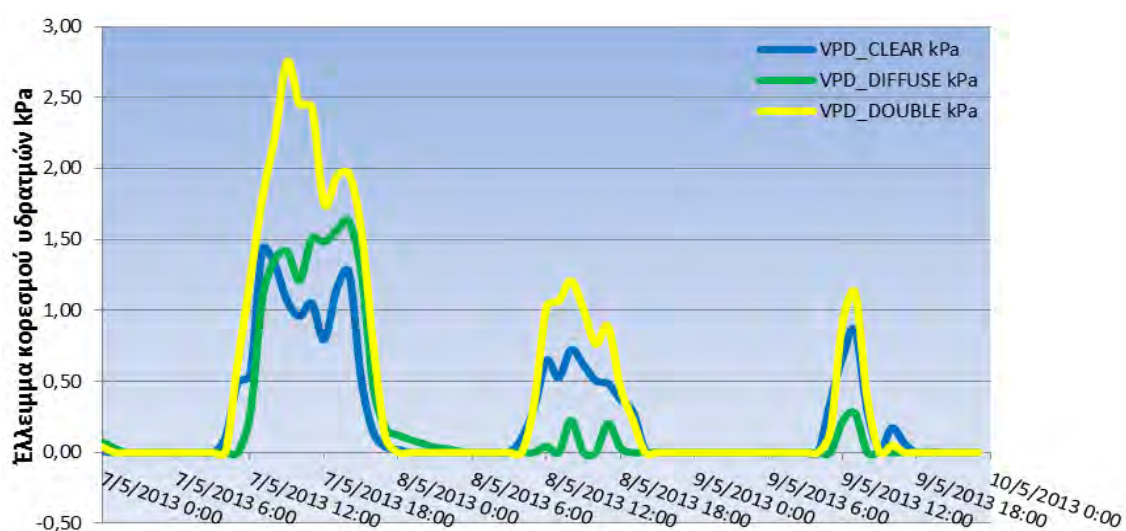
Πίνακας 47. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του ελλείμματος κορεσμού των υδρατμών κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 20-21/3/13.

Έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa)			
Βράδυ (20:00 - 08:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
20-21/3/13	0,19±0,03	0,19±0,12	0,25±0,07

Πίνακας 48. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του ελλείμματος κορεσμού των υδρατμών κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 20-21/3/13.

Από τα παραπάνω το υψηλότερο έλλειμμα κορεσμού του αέρα σε υδρατμούς παρατηρείται στο Double τις πρωινές ώρες και είναι της τάξης των 0,3 kPa σε σχέση με τα υπόλοιπα. Το βράδυ δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές.

• 7/5/13-9/5/13



Διάγραμμα 19. Πορεία των τιμών του ελλείμματος κορεσμού των υδρατμών μέσα στα θερμοκήπια για την περίοδο 7-9/5/13.

Έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa)			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7/5/13	0,78±0,51	0,89±0,70	1,47±1,00
8/5/13	0,35±0,26	0,04±0,08	0,54±0,47
9/5/13	0,19±0,29	0,04±0,09	0,20±0,38

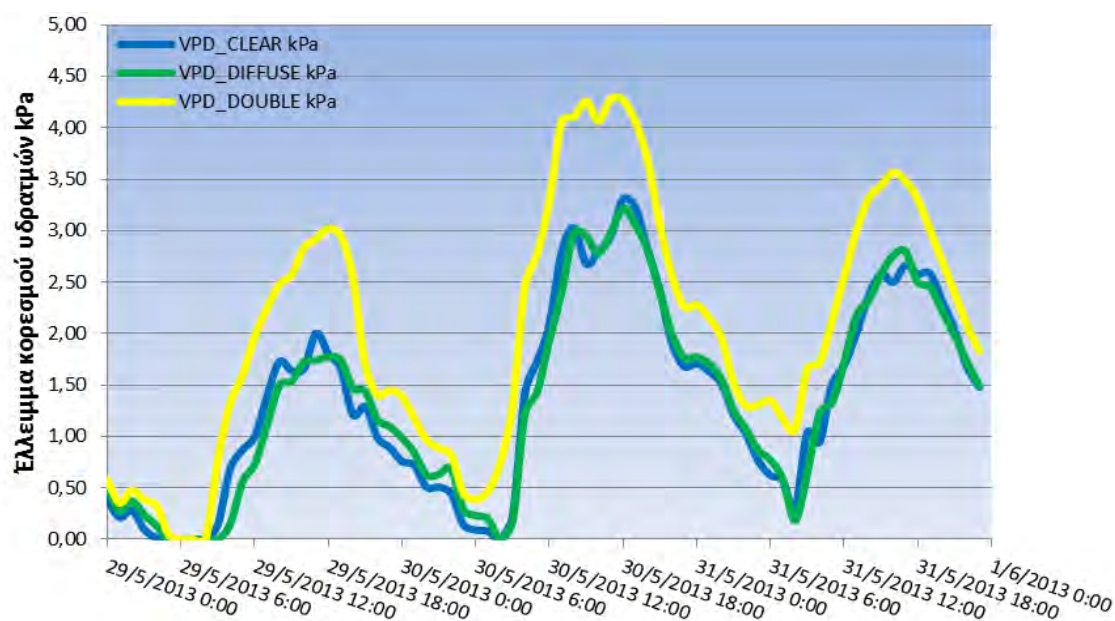
Πίνακας 49. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του ελλείμματος κορεσμού των υδρατμών κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 7-9/5/13.

Έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa)			
Βράδυ (20:00 - 08:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7-8/5/13	0,15±0,37	0,30±0,53	0,34±0,67
8-9/5/13	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00

Πίνακας 50. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του ελλείμματος κορεσμού των υδρατμών κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 7-9/5/13.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε πως τις πρωινές ώρες το Double έχει μεγαλύτερο έλλειμμα κορεσμού υδρατμών κατά 0,5 kPa σε σχέση με τα υπόλοιπα. Τις βραδινές ώρες δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές.

• 29/5/13-31/5/13



Διάγραμμα 20. Πορεία των τιμών του ελλείμματος κορεσμού των υδρατμών για την περίοδο 29-31/5/13.

Έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa)			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
29/5/13	1,21±0,64	1,08±0,70	2,10±0,93
30/5/13	2,24±1,09	2,15±1,11	3,33±1,19
31/5/13	1,93±0,77	1,91±0,83	2,69±0,81

Πίνακας 51. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του ελλείμματος κορεσμού των υδρατμών κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 29-31/5/13.

Έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa)			
Βράδυ (20:00 - 08:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
29-30/5/13	0,59±0,43	0,74±0,48	1,11±0,60
30-31/5/13	1,40±0,74	1,44±0,74	1,97±0,80

Πίνακας 52. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του ελλείμματος κορεσμού των υδρατμών κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 29-31/5/13.

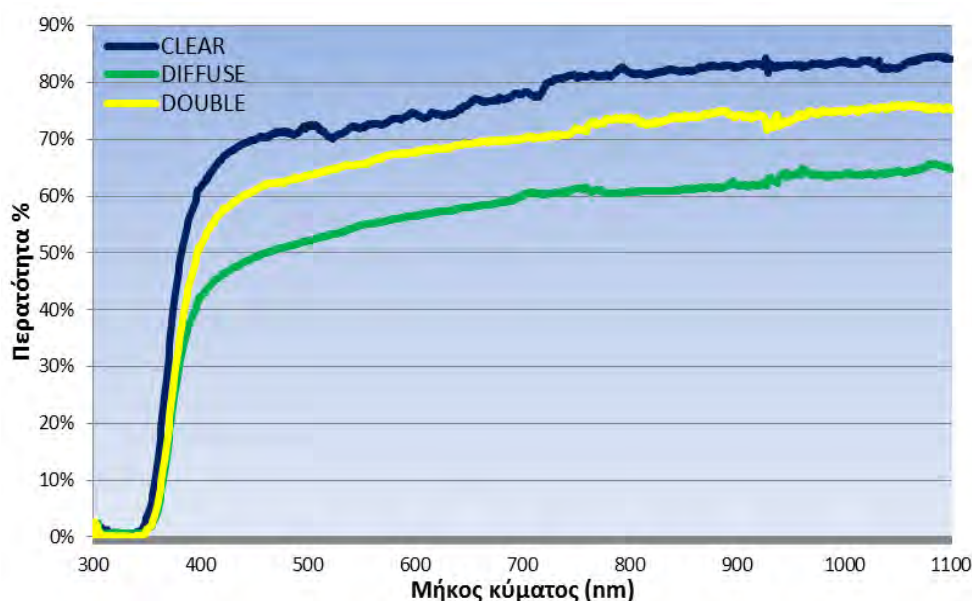
Από τα παραπάνω παρατηρούμε πως τις πρωινές ώρες το Double έχει μεγαλύτερο έλλειμμα κορεσμού υδρατμών κατά 1 kPa σε σχέση με τα υπόλοιπα. Τις βραδινές ώρες παρατηρείται επίσης υψηλότερο έλλειμμα κορεσμού στο Double κατά 0,5 kPa.

4.2 Οπτικές ιδιότητες των καλυμμάτων

4.2.1 Φασματική περατότητα των θερμοκηπίων.

Χρησιμοποιώντας το φορητό φασματοφωτόμετρο (LI-COR 1800), μετρήθηκε η φασματική περατότητα των θερμοκηπίων στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων η συσκευή έδινε ασταθείς μετρήσεις για τα μήκη κύματος κάτω των 340 nm, οπότε για την UVA ακτινοβολία λήφθηκε το φάσμα 340-400 nm. Οι μετρήσεις έγιναν με κλειστά όλα τα παράθυρα του θερμοκηπίου, πλαϊνά και οροφής. Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα και πίνακες για την περατότητα των θερμοκηπίων σε διαφορετικές φασματικές περιοχές. Επιλέχθηκαν δύο διαφορετικές μετρήσεις, η πρώτη χωρίς την καλλιέργεια στις 10/8/13 και η δεύτερη με εγκατεστημένη την καλλιέργεια στις 23/10/13.

- **10/8/13** (Χωρίς καλλιέργεια)



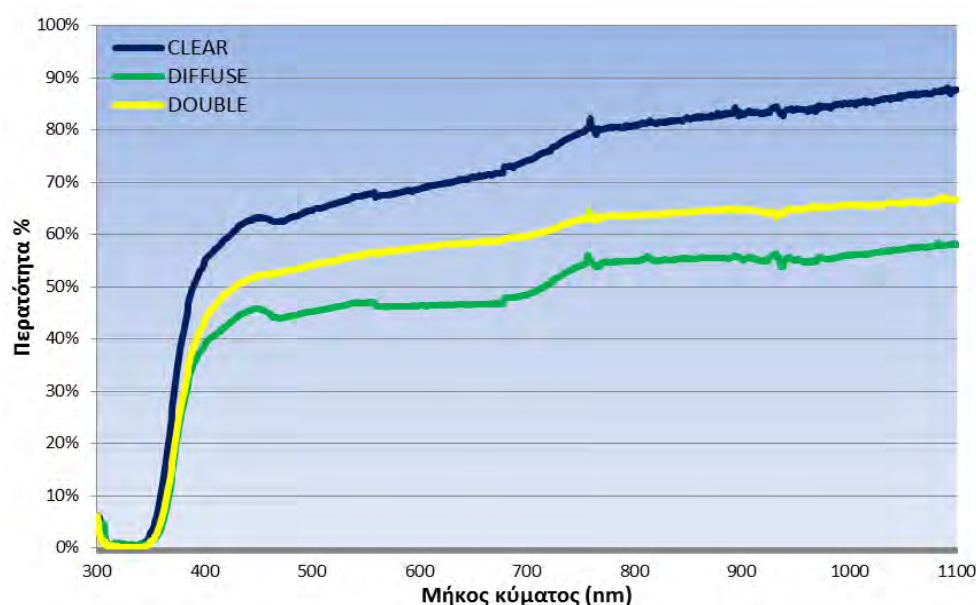
Διάγραμμα 21. Τιμές της περατότητας των τριών θερμοκηπίων στο φάσμα 340-1100 (nm).

Περατότητα θερμοκηπίων (%)			
Φασματικές περιοχές (nm)	Clear	Diffuse	Double
Υπεριώδης (340-400)	30,9	18,8	22,1
Μπλε (400-500)	68,9	48,6	60,0
PAR (400-700)	72,3	53,7	64,9
Κόκκινο (600-700)	75,8	58,0	69,0
Μακρινό κόκκινο (700-800)	80,4	60,7	71,7
Κοντινή υπέρυθρη (700-1100)	82,3	62,3	73,7
Ολική (340-1100)	74,3	55,5	66,1

Πίνακας 53. Ποσοστιαίες τιμές της περατότητας των τριών θερμοκηπίων σε διαφορετικές φασματικές περιοχές.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το Clear έχει μεγαλύτερη περατότητα κατά 18-20% σε όλα τα φάσματα (εκτός από το UVA 340-400 nm) σε σχέση με το Diffuse και 7-9 % σε σχέση με το Double. Επίσης το Double έχει μεγαλύτερη περατότητα κατά 11 % σε σχέση με το Diffuse. Όσον αφορά την UVA, το Clear έχει μεγαλύτερη περατότητα κατά 12 και 8,7 % σε σχέση με το Diffuse και το Double αντίστοιχα. Επίσης το Double παρουσιάζει μεγαλύτερη περατότητα κατά 3,3 % σε σχέση με το Diffuse.

- 23/10/13 (Με εγκατεστημένη καλλιέργεια)



Διάγραμμα 22. Τιμές της περατότητας των τριών θερμοκηπίων στο φάσμα 340-1100 (nm).

Περατότητα θερμοκηπίων (%)			
Φασματικές περιοχές (nm)	Clear	Diffuse	Double
Υπεριώδης (340-400)	26,6	17,1	18,8
Μπλε (400-500)	61,5	43,8	50,0
PAR (400-700)	66,5	45,6	54,2
Κόκκινο (600-700)	71,0	46,8	57,6
Μακρινό κόκκινο (700-800)	78,5	52,9	61,7
Κοντινή υπέρυθρη (700-1100)	82,7	55,1	64,4
Ολική (340-1100)	71,8	48,3	57,1

Πίνακας 54. Ποσοστιαίες τιμές της περατότητας των τριών θερμοκηπίων σε διαφορετικές φασματικές περιοχές.

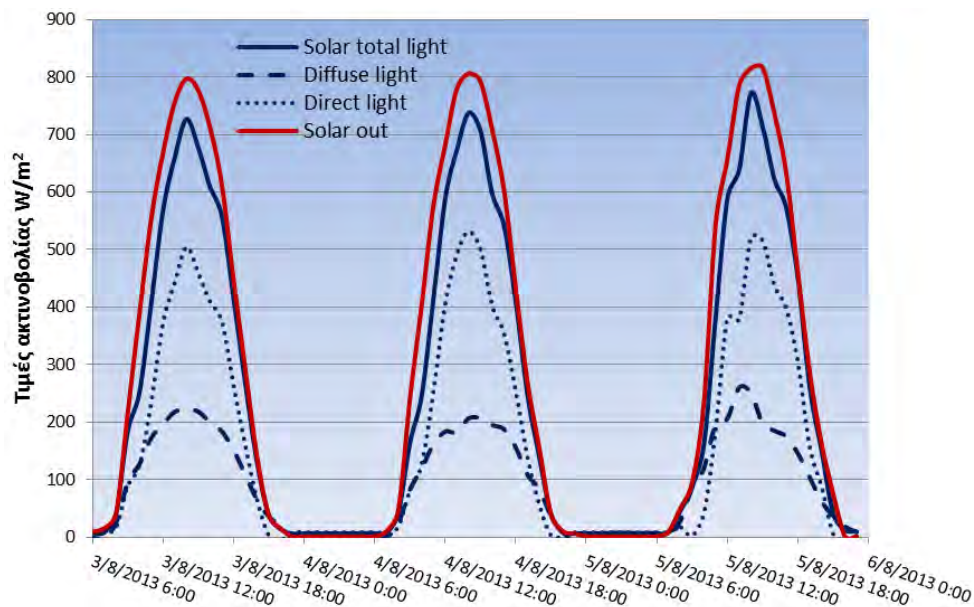
Σύμφωνα με τα παραπάνω το Clear έχει μεγαλύτερη περατότητα κατά 17 - 27 % σε όλα τα φάσματα (εκτός από το UVA 340-400 nm) σε σχέση με το Diffuse και 11 - 18 % σε σχέση με το Double. Επίσης το Double έχει μεγαλύτερη περατότητα κατά 6 - 10 % σε σχέση με το Diffuse. Όσον αφορά την UVA, το Clear έχει μεγαλύτερη περατότητα κατά 9,5 % και 7,8 % σε σχέση με το Diffuse και το Double αντίστοιχα. Επίσης το Double παρουσιάζει μεγαλύτερη περατότητα κατά 1,7 % σε σχέση με το Diffuse.

4.2.2 Καταμερισμός διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας στα θερμοκήπια

Το διάχυτο φως μέσα στο θερμοκήπιο μετρήθηκε με το στεφάνι διάχυσης της εταιρίας Kipp & Zonen (Shadow Ring CM121). Οι τιμές της διάχυτης ακτινοβολίας καταγράφονταν παράλληλα με τις τιμές της ολικής εισερχόμενης ακτινοβολίας για κάθε θερμοκήπιο στο οποίο γινόταν η μέτρηση. Η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών ακτινοβολίας (ολική – διάχυτη), μας έδωσε την άμεση ακτινοβολία.

Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα και πίνακες των τιμών της ολικής, άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας για τους τρεις τύπους πλαστικών καλυμμάτων.

- Clear



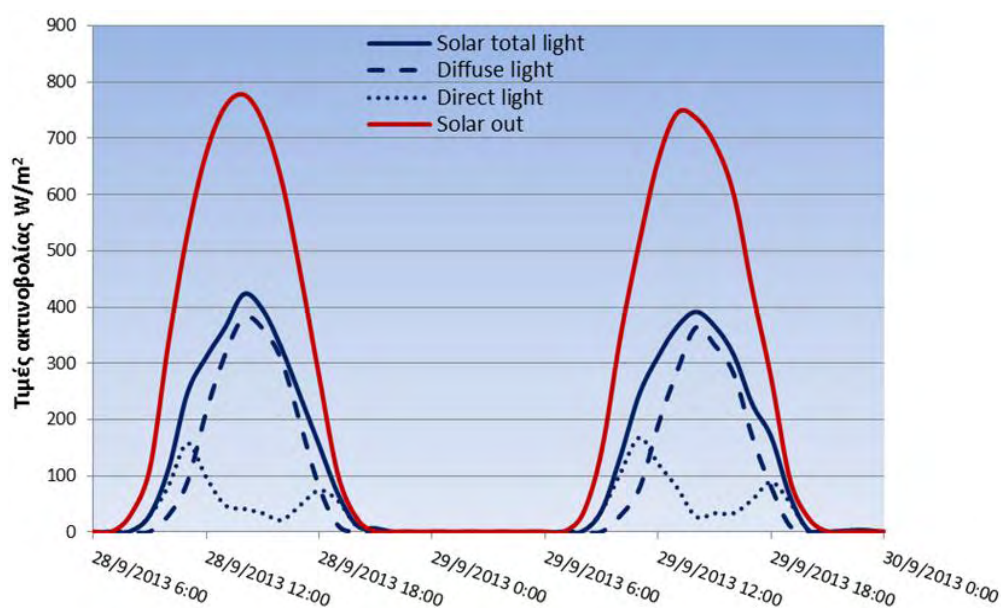
Διάγραμμα 23. Τιμές της ολικής ακτινοβολίας μέσα και έξω από το θερμοκήπιο καθώς και τιμές διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας για τις ημέρες 3-5/8/13.

Ακτινοβολία W/m ²			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Total light	Diffuse light	Direct light
3/8/13	422,65±220,32	152,28±61,45	270,37±160,60
4/8/13	423,54±227,08	145,68±55,19	277,86±174,50
5/8/13	418,75±243,03	154,99±68,44	263,76±182,55

Πίνακας 55. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις των τιμών της ολικής, διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας για το θερμοκήπιο Clear.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το Clear διαχέει το φως σε ποσοστό 36% ενώ το υπόλοιπο μέρος της ακτινοβολίας αποτελεί την άμεση ακτινοβολία.

- Diffuse



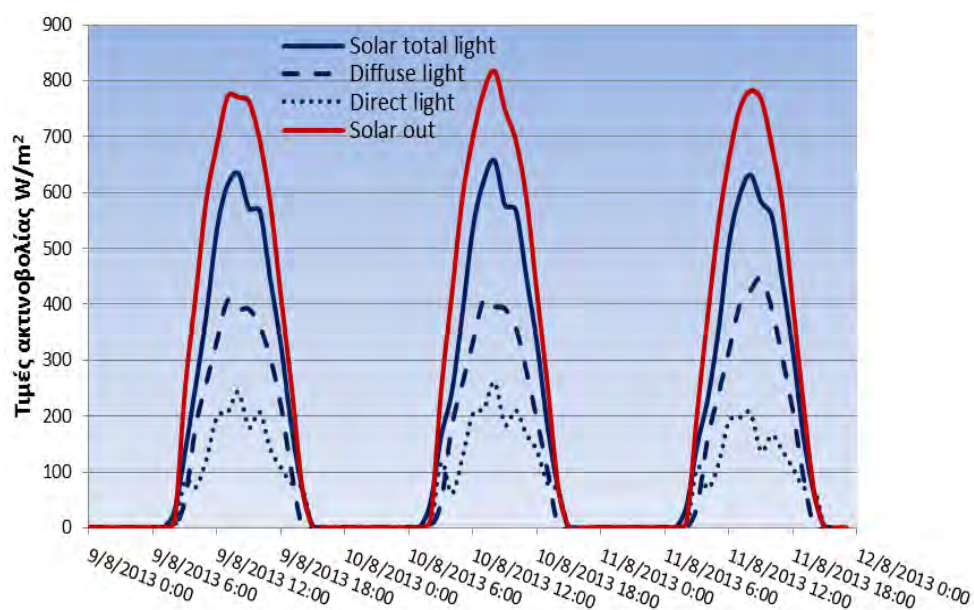
Διάγραμμα 24. Τιμές της ολικής ακτινοβολίας μέσα και έξω από το θερμοκήπιο καθώς και τιμές διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας για τις ημέρες 28-29/10/13.

Ακτινοβολία W/m ²			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Total light	Diffuse light	Direct light
28/9/13	206,77±151,93	152,69±148,46	54,08±41,72
29/9/13	202,74±143,77	140,42±137,26	62,32±48,73

Πίνακας 56. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις των τιμών της ολικής, διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας για το θερμοκήπιο Diffuse.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το Diffuse προκαλεί διάχυση του φωτός σε ποσοστό 75 % ενώ το υπόλοιπο μέρος της ακτινοβολίας αποτελεί την άμεση ακτινοβολία.

- **Double**



Διάγραμμα 25. Τιμές της ολικής ακτινοβολίας μέσα και έξω από το θερμοκήπιο καθώς και τιμές διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας για τις ημέρες 9-11/8/13.

Ακτινοβολία W/m^2			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Total light	Diffuse light	Direct light
9/8/13	364,87±206,83	230,78±145,56	132,16±68,33
10/8/13	370,98±207,03	226,81±145,78	140,78±71,96
11/8/13	355,60±204,97	232,13±156,96	121,35±57,83

Πίνακας 57. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις των τιμών της ολικής, διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας για το θερμοκήπιο Double.

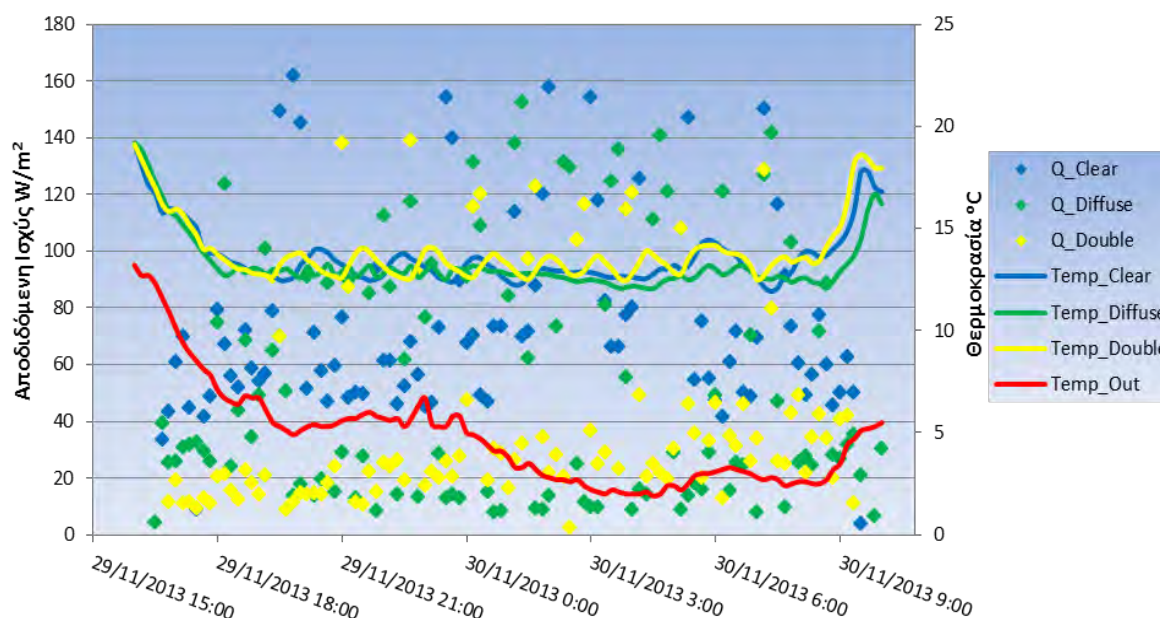
Σύμφωνα με τα παραπάνω το Double διαχέει το φως σε ποσοστό 65% ενώ το 35% αποτελεί την άμεση ακτινοβολία.

4.3 Αποτελέσματα ενεργειακής αξιολόγησης

4.3.1 Κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα θέρμανσης

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η πορεία της θερμοκρασίας τις βραδινές ώρες καθώς και η ενεργειακή κατανάλωση για κάθε μεταχείριση, για ημέρες όπου το σύστημα θέρμανσης ήταν σε λειτουργία και στα τρία θερμοκήπια. Επίσης παρουσιάζονται πίνακες με την συνολική αποδιδόμενη ενέργεια για κάθε μέρα ξεχωριστά, καθώς και η εξοικονόμηση ενέργειας που πετυχαίνεται σε σχέση με το πιο ενεργοβόρο θερμοκήπιο.

• 29/11/13 – 30/11/13

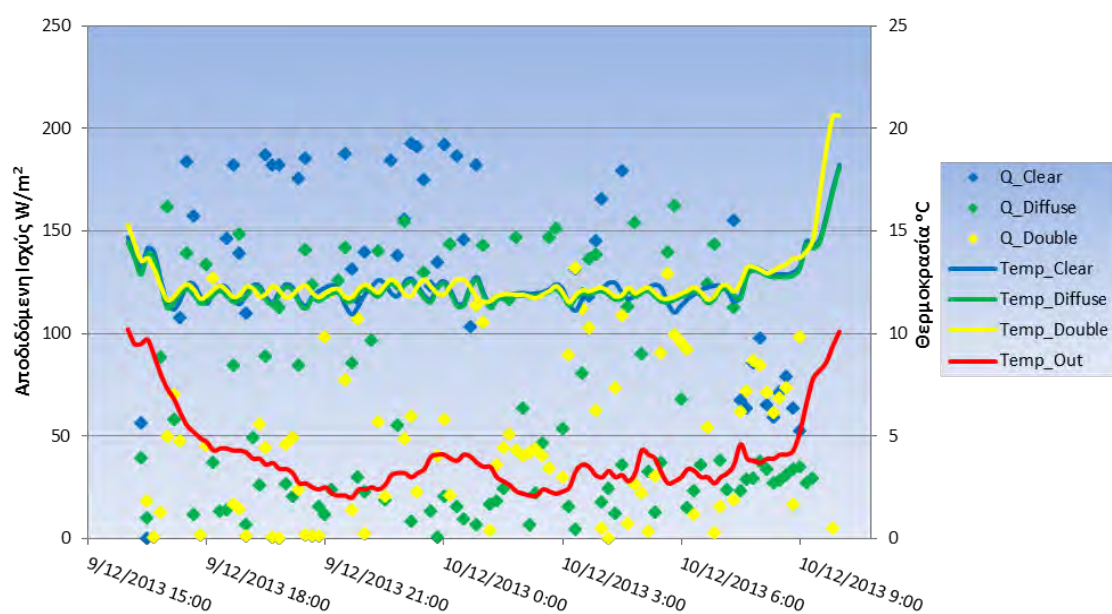


Διάγραμμα 26. Πορεία της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα (Out), των θερμοκηπίων Clear, Diffuse και Double και της ισχύος (Q) που αποδίδονταν από το σύστημα θέρμανσης κατά τις βραδινές ώρες στις 29-30/11/13.

Αποδιδόμενη ενέργεια kJ/m^2				Εξοικονόμηση ενέργειας	
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Gr1-Gr2	Gr1-Gr3
29-30/11/13	3795,07	3259,53	2323,26	14,1%	38,8%

Πίνακας 58. Αποδιδόμενη ενέργεια του συστήματος θέρμανσης για την περίοδο 29-30/11/13 και υπολογισμένη εξοικονόμηση ενέργειας.

• 9/12/13 – 10/12/13

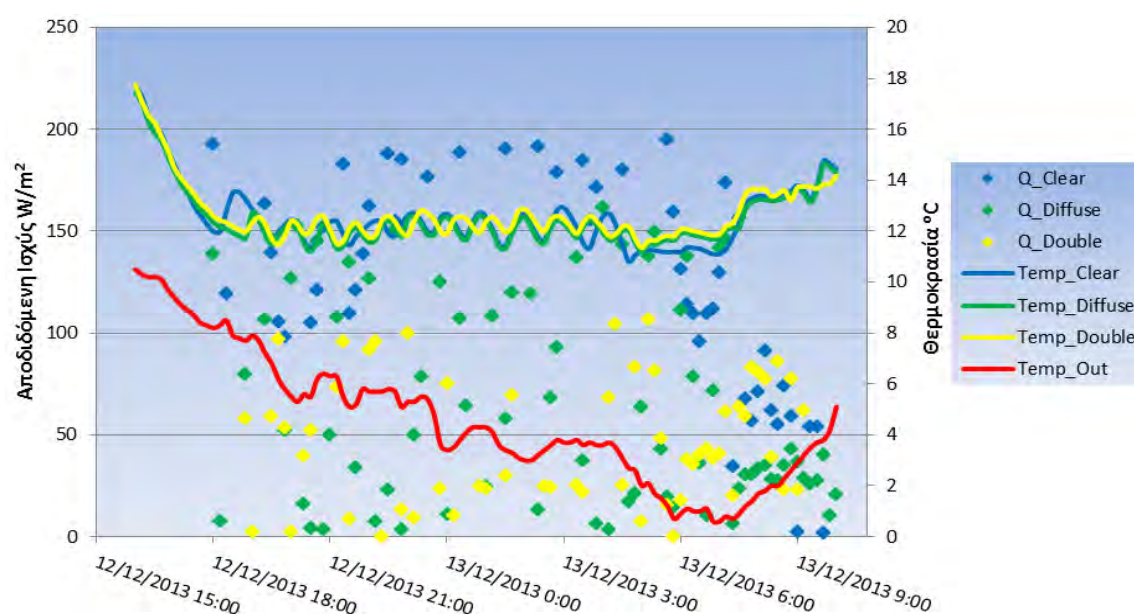


Διάγραμμα 28. Πορεία της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα (Out), των θερμοκηπίων Clear, Diffuse και Double και της ισχύος (Q) που αποδίδονταν από το σύστημα θέρμανσης κατά τις βραδινές ώρες στις 9-10/12/13.

Αποδιδόμενη ενέργεια kJ/m^2					
Ημερομηνία	Gr1(Clear)	Gr2 (Diffuse)	Gr3 (Double)	Εξοικονόμηση ενέργειας	
				Gr1-Gr2	Gr1-Gr3
9-10/12/13	3830,77	3575,72	2444,41	6,6%	36,1%

Πίνακας 60. Αποδιδόμενη ενέργεια του συστήματος θέρμανσης για την περίοδο 9-10/12/13 και υπολογισμένη εξοικονόμηση ενέργειας.

• 12/12/13 – 13/12/13

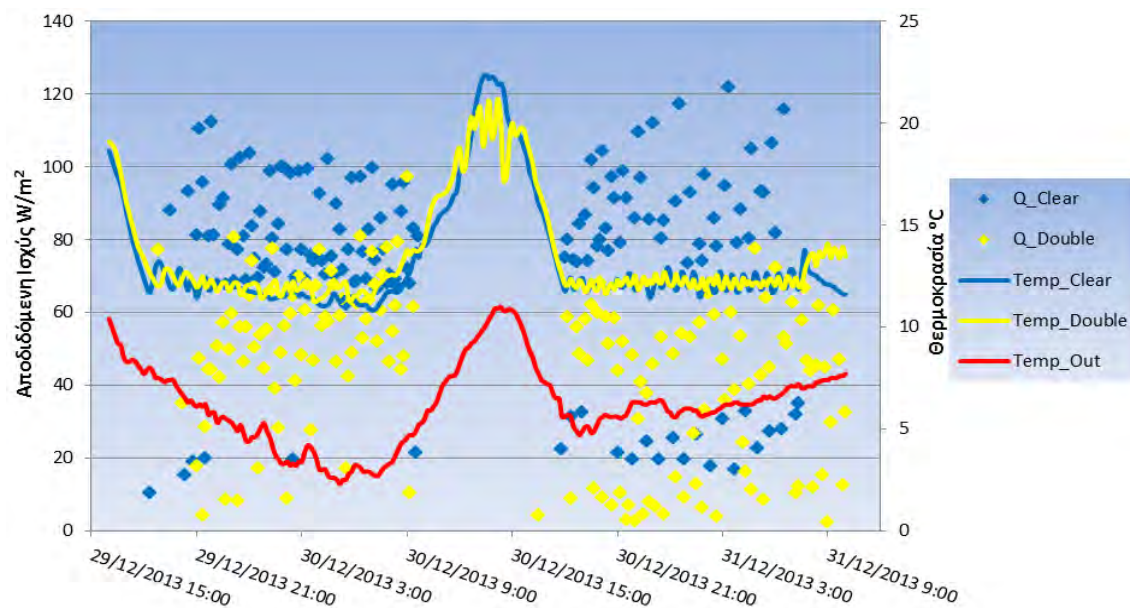


Διάγραμμα 29. Πορεία της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα (Out), των θερμοκηπίων Clear, Diffuse και Double και της ισχύος (Q) που αποδίδονταν από το σύστημα θέρμανσης κατά τις βραδινές ώρες στις 12-13/12/13.

Αποδιδόμενη ενέργεια kJ/m^2					
Ημερομηνία	Gr1(Clear)	Gr2 (Diffuse)	Gr3 (Double)	Εξοικονόμηση ενέργειας	
				Gr1-Gr2	Gr1-Gr3
12-13/12/13	3670,66	2835,49	1653,24	22,7%	55%

Πίνακας 61. Αποδιδόμενη ενέργεια του συστήματος θέρμανσης για την περίοδο 12-13/12/13 και υπολογισμένη εξοικονόμηση ενέργειας.

• 29/12/13 – 31/12/13



Διάγραμμα 30. Πορεία της θερμοκρασίας του αέρα έξω (Out), των θερμοκηπίων Clear, και Double και της ισχύος (Q) που αποδίδονταν από το σύστημα θέρμανσης για την περίοδο 29-31/12/13.

Αποδιδόμενη ενέργεια kJ/m^2			
Ημερομηνία	Gr1 (Clear)	Gr3 (Double)	Εξοικονόμηση ενέργειας
29-30/12/13	3809,96	2406,02	36,8%
30-31/12/13	2770,84	1396,59	49,5%
Σύνολο	6580,80	3802,61	42,2%

Πίνακας 62. Αποδιδόμενη ενέργεια του συστήματος θέρμανσης για την περίοδο 29-31/12/13 και υπολογισμένη εξοικονόμηση ενέργειας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το Double αποδείχτηκε το λιγότερο ενεργοβόρο σε σχέση με τα υπόλοιπα σε ποσοστό από 36 έως και 55%. Μια μέση τιμή εξοικονόμησης ενέργειας για το Double κυμαίνεται στο 45 και 40% σε σχέση με το Clear και το Diffuse αντίστοιχα. Επίσης παρατηρείται χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση στο Diffuse από 3,2 έως 22,7% σε σχέση με το Clear, με την μέση τιμή να κυμαίνεται στο 11,6%.

Για τις παραπάνω ημέρες υπολογίστηκε η μέση τιμή του συντελεστή θερμικών απωλειών (U) για κάθε θερμοκήπιο.

Συντελεστής απωλειών θερμότητας U (W/m ² /°C)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
29-30/11/13	5,07	4,19	2,23
9-10/12/13	8,81	4,70	3,63
12-13/12/13	8,74	5,48	3,64
29-30/12/13	6,04	-	3,75
30-31/12/13	6,41	-	3,22
ASAE Standard	6,2		4 - 2,8 (IR)

Πίνακας 63. Αποδιδόμενη ενέργεια του συστήματος θέρμανσης για την περίοδο 29-31/12/13 και υπολογισμένη εξοικονόμηση ενέργειας.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα ο συντελεστής απωλειών θερμότητας είναι ο χαμηλότερος στο Double, ενώ ο υψηλότερος είναι στο Clear. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συμφωνούν μέχρι ένα βαθμό με τα αυτά του ASAE 2003 (American Society of Engineers) όσον αφορά τις θερμικές απώλειες διαφόρων υλικών κάλυψης των θερμοκηπίων.

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα θερμοκήπιο στην περιοχή του Βελεστίνου έκτασης ενός εκταρίου (10.000 m²) και ύψους 5,5m τότε η ενέργεια που θα σπαταλούσαμε για την θέρμανσή του για μία ημέρα (ελάχιστη θερμοκρασία 12 °C) θα ήταν περίπου:

- 36023 MJ/ημέρα για κάλυψη με απλό πλαστικό φύλλο
- 31844 MJ/ημέρα για κάλυψη με φύλλο διάχυσης
- 19812 MJ/ημέρα για κάλυψη με διπλό φουσκωτό φύλλο.

Παρακάτω παρουσιάζονται δύο πίνακες με τις ποσότητες διαφόρων καυσίμων που χρειάζονται καθημερινά για θέρμανση, καθώς και το ημερήσιο κόστος για κάθε καύσιμο. Ο πίνακας 64 αναφέρεται σε θερμοκήπιο 10000 m² με απλό πλαστικό κάλυμμα (Clear) και ο πίνακας 65 σε θερμοκήπιο με διπλό φουσκωτό κάλυμμα (Double).

	Θερμική ισχύς	Ποσότητα καυσίμου	Τιμή		Κόστος €
Ελαφρύ πετρέλαιο θέρμανσης	35,8 MJ/lit	1006,24	1,3	€/lt	1308
Φυσικό αέριο 93% (μεθάνιο)	37,6 MJ/lit	958,07	0,8	€/lt	766
Μαζούτ	39,1 MJ/lit	921,31	0,71	€/lt	654
Μπριγκέτες	20,2 MJ/kg	1783,34	0,25	€/kg	445
Ρεύμα	3,6 MJ	10006,52	0,09	€/kWh	900

Πίνακας 64. Ποσότητες και συνολικό κόστος καυσίμων για θέρμανση μίας ημέρας σε θερμοκήπιο με απλό πλαστικό κάλυμμα.

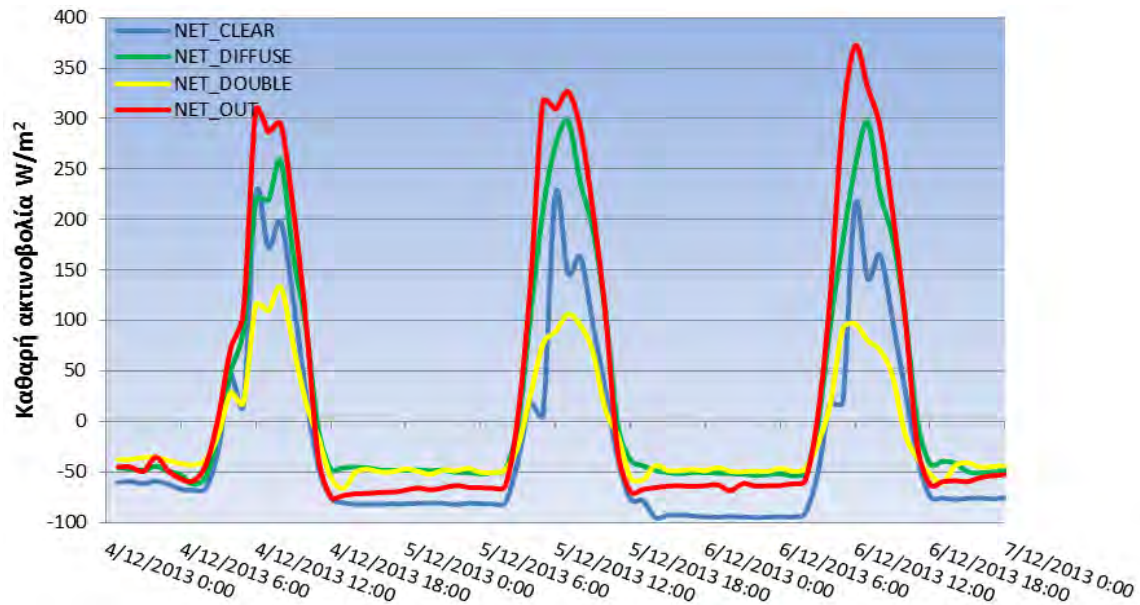
	Θερμική ισχύς	Ποσότητα καυσίμου	Τιμή		Κόστος €
Ελαφρύ πετρέλαιο θέρμανσης	35,8 MJ/lit	553,40	1,3	€/lt	719
Φυσικό αέριο 93% (μεθάνιο)	37,6 MJ/lit	526,91	0,8	€/lt	421
Μαζούτ	39,1 MJ/lit	506,70	0,71	€/lt	359
Μπριγκέτες	20,2 MJ/kg	980,79	0,25	€/kg	245
Ρεύμα	3,6 MJ	5503,33	0,09	€/kWh	495

Πίνακας 65. Ποσότητες και συνολικό κόστος καυσίμων για θέρμανση μίας ημέρας σε θερμοκήπιο με διπλό φουσκωτό πλαστικό κάλυμμα.

4.3.2 Καθαρή ακτινοβολία

Παρακάτω παρουσιάζεται η πορεία των τιμών της καθαρής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για δύο περιόδους, όταν το σύστημα της θέρμανσης ήταν σε λειτουργία.

- 4/12/13-6/12/13



Διάγραμμα 31. Πορεία της καθαρής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για την περίοδο 4-6/12/13.

Καθαρή ακτινοβολία W/m ²				
Πρωί (08:00 - 17:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
4/12/13	79,30±97,72	114,61±102,32	49,98±57,19	149,39±123,28
5/12/13	63,20±95,11	152,24±113,48	44,77±52,24	181,91±136,13
6/12/13	60,71±95,93	142,19±109,35	35,58±50,48	186,12±142,71

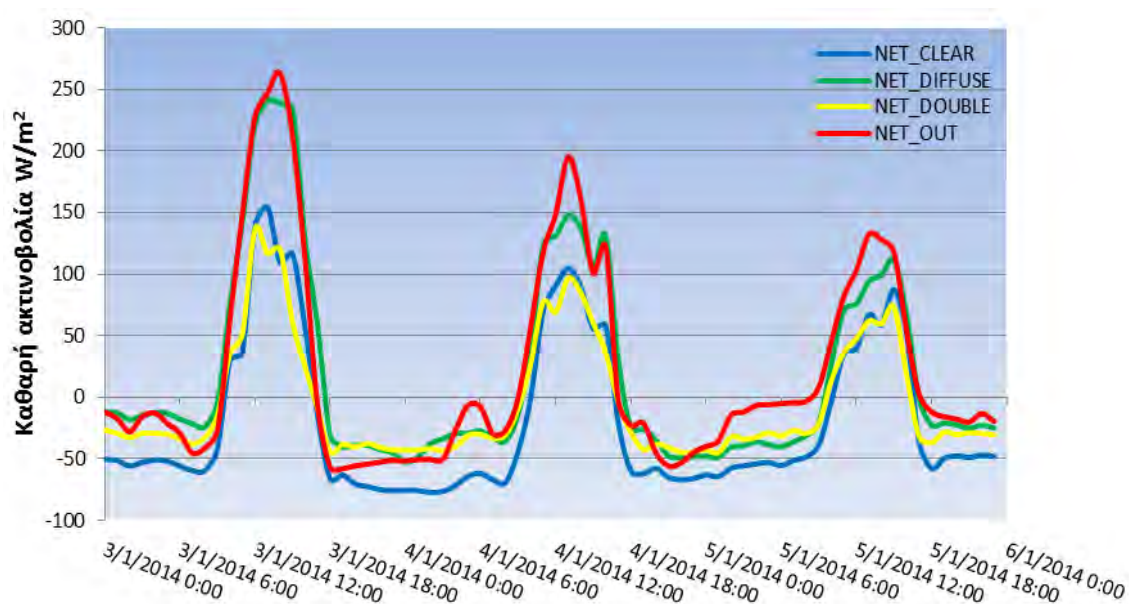
Πίνακας 66. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της καθαρής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 4-6/12/13.

Καθαρή ακτινοβολία W/m ²				
Βράδυ (17:00 - 08:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
4-5/12/13	-78,56±9,26	45,65±10,09	-48,43±9,61	-66,07±8,56
5-6/12/13	-88,30±14,47	-47,15±11,66	-46,84±9,11	-62,00±8,48

Πίνακας 67. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της καθαρής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 4-6/12/13.

Τις πρωινές ώρες στο Diffuse έχουμε μεγαλύτερη ροή ενέργειας κατά 55 και 70% σε σχέση με το Clear και το Double αντίστοιχα. Επίσης, το Clear έχει κατά 40% υψηλότερη καθαρή ακτινοβολία σε σχέση με το Double. Κατά την διάρκεια της νύχτας τα Diffuse και Double έχουν την ίδια ροή ενέργειας ενώ έχουν χαμηλότερες απώλειες σε καθαρή ακτινοβολία κατά 40% σε σχέση με το Clear. Πιο συγκεκριμένα το Clear έχει απώλεια σε θερμική ακτινοβολία κατά 40 W/m² σε σχέση με τα υπόλοιπα.

• 4/1/13-6/1/13



Διάγραμμα 32. Πορεία της καθαρής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια για την περίοδο 4-6/12/13.

Καθαρή ακτινοβολία W/m ²				
Πρωί (08:00 - 17:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
3/1/13	75,19±61,97	159,70±84,86	66,50±49,81	155,78±94,97
4/1/13	52,95±47,39	100,22±53,36	55,29±32,88	112,76±57,76
5/1/13	37,31±37,96	65,47±40,52	36,26±29,26	83,96±41,70

Πίνακας 68. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της καθαρής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 3-5/1/13.

Καθαρή ακτινοβολία W/m ²				
Βράδυ (17:00 - 08:00)				
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double	Out
3-4/1/13	-65,84±14,95	-30,47±23,88	-35,04±10,48	-37,34±20,22
4-5/1/13	-55,16±11,12	-34,00±18,19	-33,23±10,15	-21,37±19,58

Πίνακας 69. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της καθαρής ακτινοβολίας μέσα και έξω από τα θερμοκήπια κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 3-5/1/13.

Για τις περίοδο 4-6/1/13, τις πρωινές ώρες το Diffuse έχει μεγαλύτερη ροή ενέργειας κατά 50% σε σχέση με το Clear και το Double. Επίσης, το Clear φαίνεται να παίρνει παρόμοιες τιμές καθαρής ακτινοβολίας σε σχέση με το Double. Κατά την

διάρκεια της νύχτας τα Diffuse και Double έχουν την ίδια ροή ενέργειας ενώ έχουν χαμηλότερες απώλειες σε καθαρή ακτινοβολία κατά 40% σε σχέση με το Clear. Το πλεόνασμα σε θερμική ακτινοβολία των Diffuse και Double είναι της τάξης του 25-35 W/m² σε σχέση με το Clear.

Η ικανότητα του Double και του Diffuse να εγκλωβίζουν μεγαλύτερα ποσά θερμικής ακτινοβολίας σε σχέση με το Clear, είχε σαν αποτέλεσμα να ψύχονται πιο αργά κατά την διάρκεια της νύχτας και να έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις σε θέρμανση.

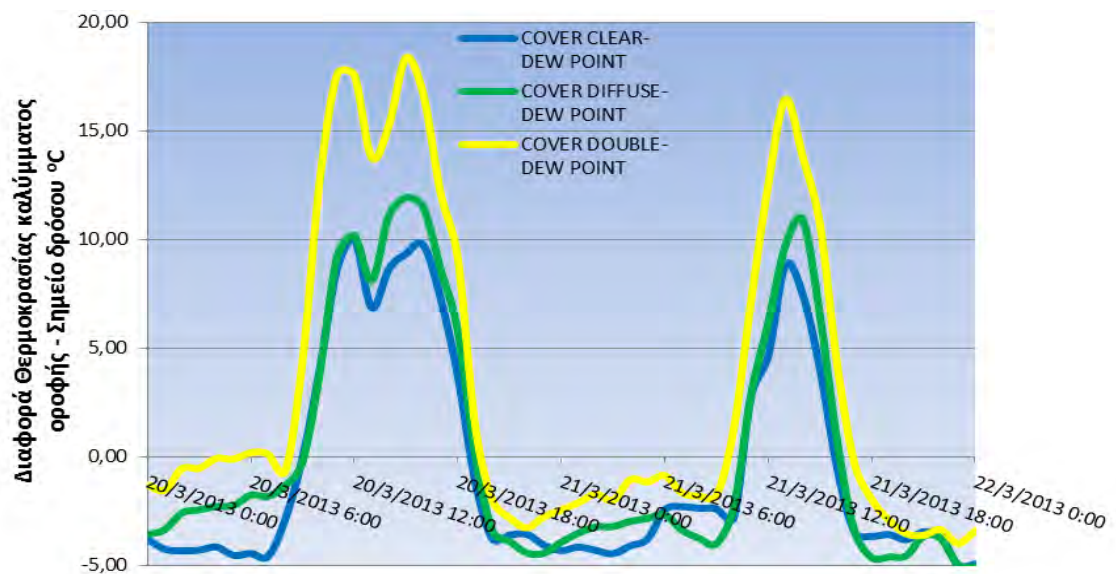
4.4 Δημιουργία συμπυκνώσεων στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος οροφής

4.4.1 Θερμοκρασία καλύμματος οροφής - Θερμοκρασία δρόσου

Θερμοκρασία δρόσου ονομάζεται το σημείο εκείνο στο οποίο ο αέρας ψύχεται, μειώνει τον όγκο του και αποβάλλει την υγρασία του. Όταν η ψύξη είναι άμεση (επαφή του αέρα με ψυχρή επιφάνεια) η υγρασία του αέρα συμπυκνώνεται με την μορφή σταγόνων πάνω σε μια κρύα επιφάνεια (πλαστικό κάλυμμα). Το φαινόμενο λοιπόν της υγροποίησης των υδρατμών πάνω στο κάλυμμα του θερμοκηπίου συμβαίνει όταν η θερμοκρασία του καλύμματος πέσει κάτω από το σημείο δρόσου του αέρα. Η συμπύκνωση των υδρατμών πάνω στο κάλυμμα μπορεί να συμβεί πιο εύκολα όταν η σχετική υγρασία του θερμοκηπίου είναι υψηλή, οπότε μια μικρή μείωση της θερμοκρασίας μπορεί να προκαλέσει την υγροποίηση των υδρατμών. Η συμπύκνωση των υδρατμών στο κάλυμμα μπορεί να μειωθεί είτε μειώνοντας την σχετική υγρασία του θερμοκηπίου είτε αυξάνοντας την θερμοκρασία του καλύμματος.

Παρακάτω παρουσιάζονται 3 διαφορετικές περίοδοι για τις οποίες μελετήθηκε η θερμοκρασία του καλύμματος σε σχέση με την θερμοκρασία δρόσου καθώς και ο ρυθμός συμπύκνωσης στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος.

- 20/3/13-21/3/13 (με θέρμανση)



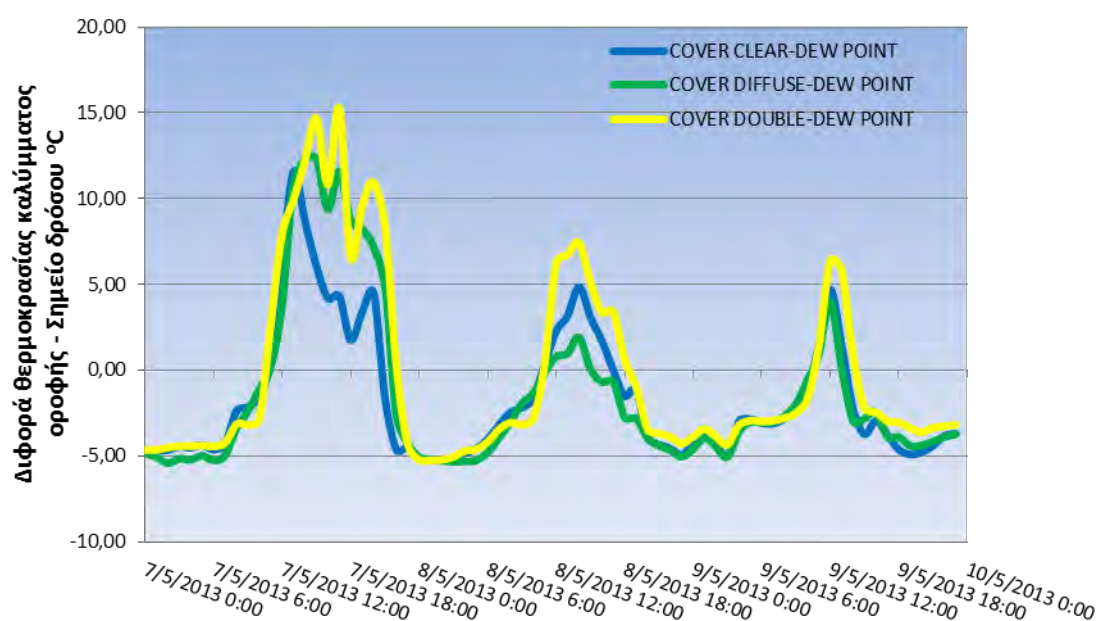
Διάγραμμα 33. Διαφορά θερμοκρασίας καλύμματος οροφής και σημείου δρόσου για την περίοδο 20-21/3/13.

Θερμοκρασία καλύμματος - Θερμοκρασία δρόσου °C			
Βράδυ (20:00 - 08:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
20-21/3/13	-3,65±0,77	-3,52±0,56	-1,98±0,72

Πίνακας 70. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της διαφοράς θερμοκρασίας καλύμματος οροφής και της θερμοκρασίας δρόσου κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 20-21/3/13.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως κατά την διάρκεια της μέρας (08:00- 18:00) η διαφορά θερμοκρασίας καλύμματος-σημείου δρόσου είναι θετική συνεπώς δεν έχουμε υγραποιήσεις στο κάλυμμα. Αντιθέτως κατά την διάρκεια της νύχτας η διαφορά παίρνει αρνητικές τιμές με αποτέλεσμα την συμπύκνωση υδρατμών στο κάλυμμα, σε διαφορετικά μεγέθη για κάθε θερμοκήπιο. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ καλύμματος και σημείου δρόσου κατά την διάρκεια της νύχτας, είναι μεγαλύτερη κατά 1,5 °C στο Double λόγω του θερμότερου εσωτερικού καλύμματος το οποίο δεν βρίσκεται σε επαφή με τον ψυχρότερο εξωτερικό αέρα.

• 7/5/13-9/5/13



Διάγραμμα 34. Πορεία της διαφοράς της θερμοκρασίας καλύμματος οροφής και του σημείου δρόσου για την περίοδο 7-9/5/13.

Θερμοκρασία καλύμματος - Θερμοκρασία δρόσου °C			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7/5/13	3,49±4,23	5,98±5,82	7,03±6,61
8/5/13	0,21±2,64	-1,04±1,77	1,53±4,07
9/5/13	-2,78±1,71	-1,92±2,44	-0,78±3,41

Πίνακας 71. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της διαφοράς θερμοκρασίας καλύμματος οροφής και της θερμοκρασίας δρόσου κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 7-9/5/13.

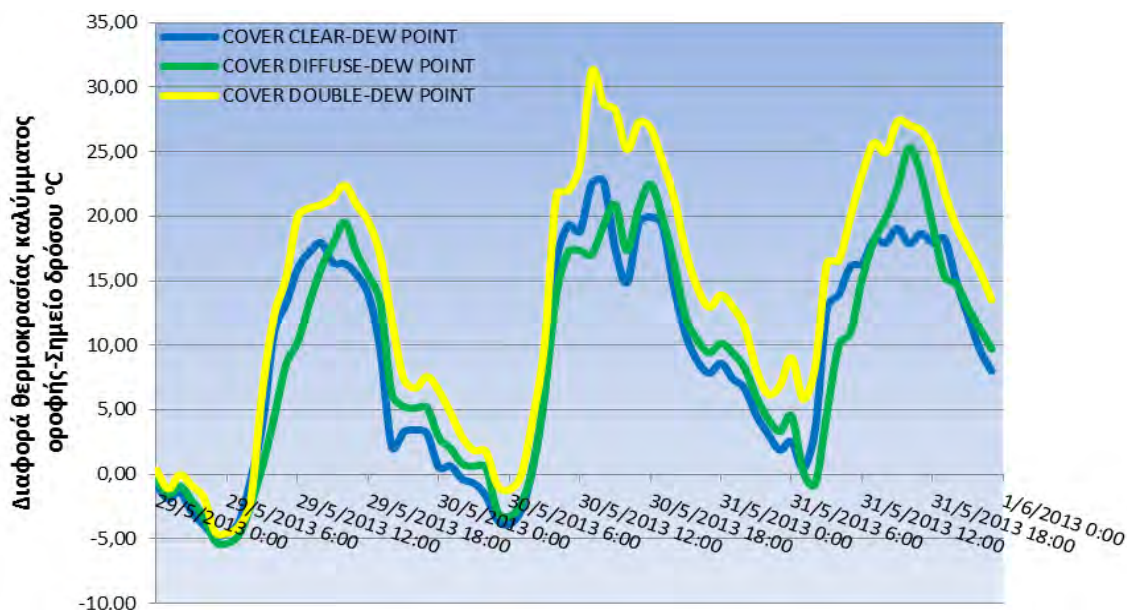
Θερμοκρασία καλύμματος - Θερμοκρασία δρόσου °C			
Βράδυ (20:00 - 08:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7-8/5/13	-3,54±2,68	-2,93±4,11	-1,96±5,40
8-9/5/13	-3,82±0,80	-3,96±0,82	-3,52±0,52

Πίνακας 72. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της διαφοράς θερμοκρασίας καλύμματος οροφής και της θερμοκρασίας δρόσου κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 7-9/5/13.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως κατά την διάρκεια της πρώτης μέρας η διαφορά θερμοκρασίας καλύμματος - σημείου δρόσου είναι θετική συνεπώς δεν έχουμε υγροποιήσεις στο κάλυμμα. Αντιθέτως τις επόμενες 2 ημέρες όπου

επικρατεί και υψηλότερη σχετική υγρασία, το Clear και το Diffuse έχουν μηδενικές ή αρνητικές στις πρώτες πρωινές ώρες ή νωρίς το απόγευμα, που σημαίνει πως στο κάλυμμα έχουμε συμπύκνωση υδρατμών. Κατά την διάρκεια της νύχτας η διαφορά παίρνει αρνητικές τιμές με αποτέλεσμα την υγροποίηση στο κάλυμμα για όλες τις μεταχειρίσεις.

• 29/5/13-31/5/13



Διάγραμμα 35. Πορεία της διαφοράς της θερμοκρασίας καλύμματος οροφής και του σημείου δρόσου για την περίοδο 29-31/5/13.

Θερμοκρασία καλύμματος - Θερμοκρασία δρόσου °C			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
29/5/13	11,75±6,17	10,79±6,90	15,90±7,17
30/5/13	16,33±6,33	16,11±6,16	22,70±7,56
31/5/13	15,81±4,18	15,24±7,47	21,52±5,55

Πίνακας 73. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της διαφοράς θερμοκρασίας καλύμματος οροφής και της θερμοκρασίας δρόσου κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 29-31/5/13.

Θερμοκρασία καλύμματος - Θερμοκρασία δρόσου °C			
Βράδυ (20:00 - 08:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
29-30/5/13	0,06±2,53	1,60±3,22	4,12±3,88
30-31/5/13	6,21±3,99	7,21±4,86	11,43±4,64

Πίνακας 74. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της διαφοράς της θερμοκρασίας καλύμματος οροφής και της θερμοκρασίας δρόσου κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 29-31/5/13.

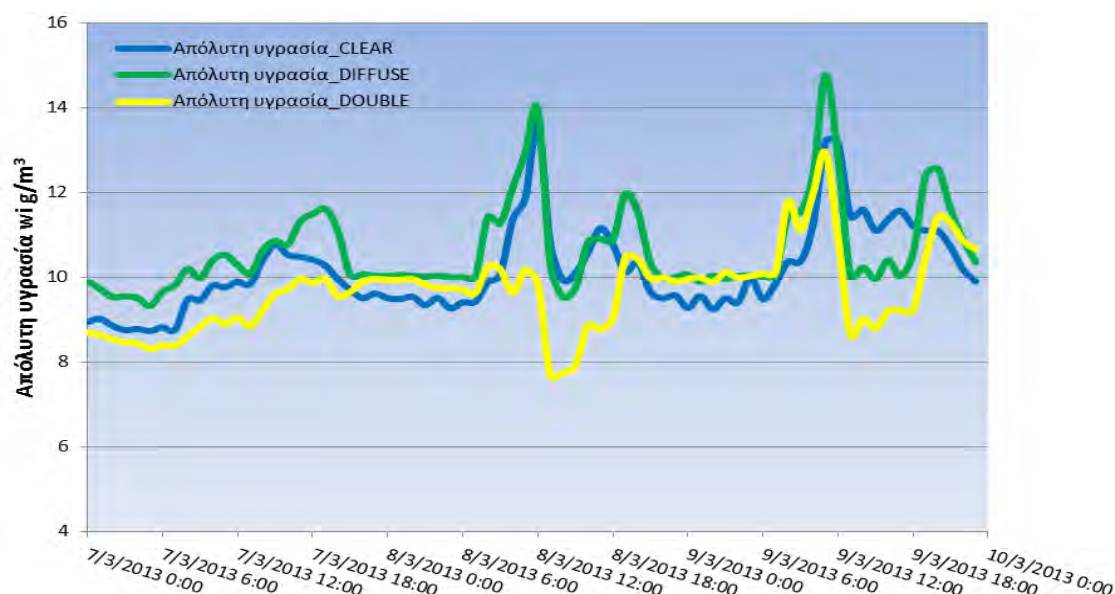
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω όταν η διαφορά θερμοκρασίας καλύμματος οροφής - σημείου δρόσου είναι θετική, τότε δεν έχουμε υγροποιήσεις στο κάλυμμα. Κατά την διάρκεια της μέρας η διαφορά θερμοκρασίας δεν παίρνει αρνητικές τιμές σε καμία μεταχείριση οπότε δεν υπάρχει συμπύκνωση στο κάλυμμα. Κατά την διάρκεια της νύχτας 29-30/5/13 παρατηρούμε πώς η διαφορά θερμοκρασίας στα Diffuse και Clear παίρνει αρνητικές τιμές για περισσότερες ώρες σε σχέση με το Double, με αποτέλεσμα η συμπύκνωση στο Double να συμβαίνει για λιγότερες ώρες κατά την διάρκεια της νύχτας. Τέλος κατά την διάρκεια της νύχτας 30-31/5/13 μόνο το Diffuse θα έχει συμπύκνωση στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος.

4.4.2 Απόλυτη υγρασία

Η απόλυτη υγρασία του αέρα απεικονίζει καλύτερα την υδατική κατάσταση του αέρα του θερμοκηπίου αφού η τιμή αυτή συμπεριλαμβάνει την σχετική υγρασία μαζί με την θερμοκρασία του αέρα. Η σχετική υγρασία αδυνατεί να περιγράψει πλήρως την υδατική κατάσταση του αέρα καθώς σε θερμοκρασία αέρα 16 °C και σχετική υγρασία 75%, η απόλυτη υγρασία είναι 8,9 g/m³ αέρα ενώ η θερμοκρασία δρόσου είναι 11,7 °C. Σε παρόμοια όμως σχετική υγρασία (75%) και θερμοκρασία 21 °C, η απόλυτη υγρασία είναι 12,3 g/m³ αέρα, ενώ το σημείο δρόσου είναι 17 °C.

Παρακάτω παρουσιάζονται σε διαγράμματα και πίνακες η πορεία της απόλυτης υγρασίας καθώς και η μέσοι όροι για τις 4 διαφορετικές περιόδους που μελετήθηκαν και παραπάνω.

• 7/3/13-9/3/13



Διάγραμμα 36. Πορεία των τιμών της απόλυτης υγρασίας των θερμοκηπίων για την περίοδο 7-9/3/13.

Απόλυτη υγρασία (g/m ³)			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7/5/13	10,08±0,41	10,71±0,52	9,32±0,46
8/5/13	10,82±0,99	11,34±1,18	9,31±1,00
9/5/13	11,45±0,82	11,47±1,40	10,36±1,37

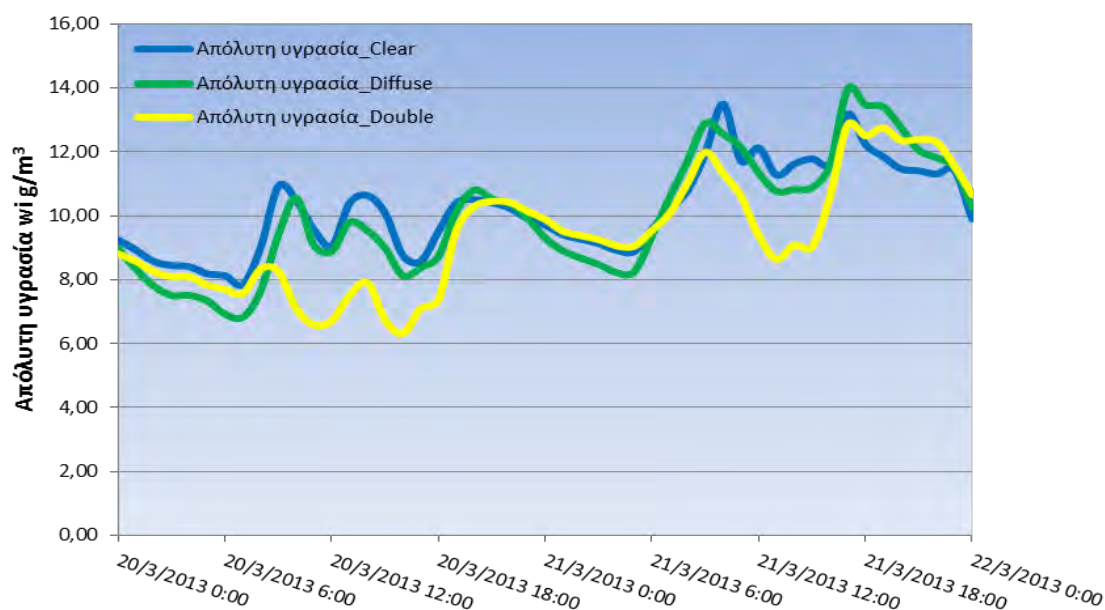
Πίνακας 75. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της απόλυτης υγρασίας του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 7-9/3/13.

Απόλυτη υγρασία (g/m ³)			
Βράδυ (20:00 - 08:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7-8/5/13	9,55±0,19	10,22±0,45	9,83±0,18
8-9/5/13	9,68±0,35	10,26±0,53	10,17±0,48

Πίνακας 76. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της απόλυτης υγρασίας του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 7-9/3/13.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το Double έχει χαμηλότερη απόλυτη υγρασία κατά 10% τις πρωινές ώρες σε σχέση με τα υπόλοιπα. Κατά την διάρκεια της νύχτας δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές.

• 20/3/13-21/3/13



Διάγραμμα 37. Πορεία της απόλυτης υγρασίας των θερμοκηπίων για την περίοδο 20-21/3/13.

Απόλυτη υγρασία (g/m ³)			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
20/3/13	9,84±0,80	9,23±0,93	7,67±1,18
21/3/13	11,93±0,73	12,07±1,09	10,93±1,52

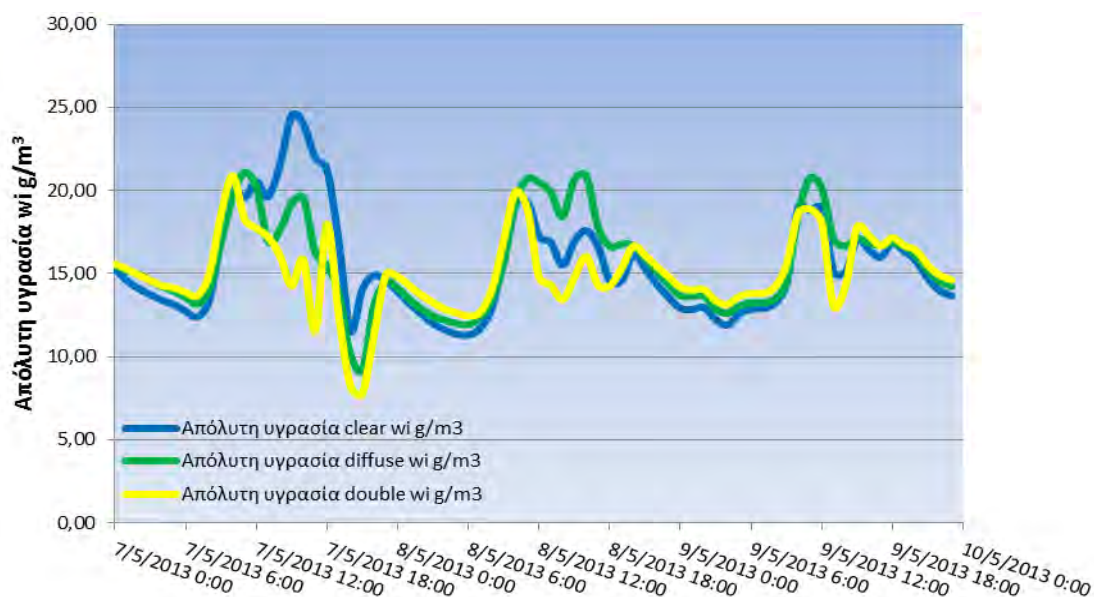
Πίνακας 77. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της απόλυτης υγρασίας του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 20-21/3/13.

Απόλυτη υγρασία (g/m ³)			
Βράδυ (20:00 - 08:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
20-21/3/13	9,76±0,63	9,63±1,12	9,85±0,61

Πίνακας 78. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της απόλυτης υγρασίας του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 20-21/3/13.

Κατά την διάρκεια των πρωινών ωρών το Double διατηρεί χαμηλότερη απόλυτη υγρασία κατά 15-20% σε σχέση με τα υπόλοιπα. Τις βραδινές ώρες δεν παρατηρούνται διαφορές.

• 7/5/13-9/5/13



Διάγραμμα 38. Πορεία των τιμών της απόλυτης υγρασίας των θερμοκηπίων για την περίοδο 7-9/5/13.

Απόλυτη υγρασία (g/m ³)			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7/5/13	19,40±3,78	17,00±3,09	15,70±3,41
8/5/13	16,44±1,79	18,27±2,32	15,68±1,97
9/5/13	16,39±1,78	17,04±1,97	16,51±1,80

Πίνακας 79. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της απόλυτης υγρασίας του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 7-9/5/13.

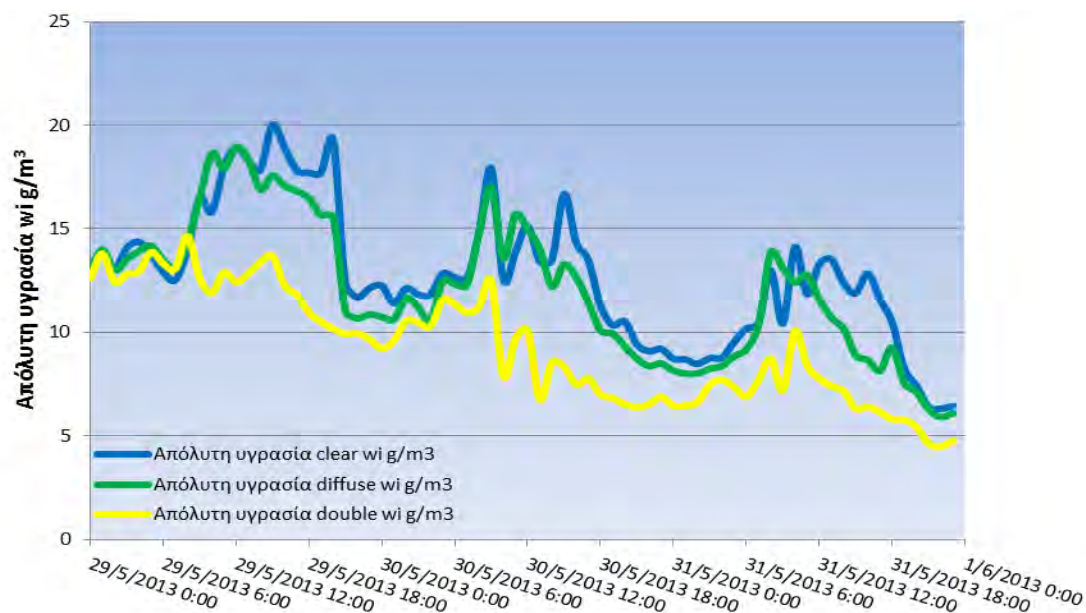
Απόλυτη υγρασία (g/m ³)			
Βράδυ (20:00 - 08:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7-8/5/13	12,76±1,28	12,45±1,49	12,55±2,25
8-9/5/13	13,37±1,21	13,97±1,23	14,40±1,06

Πίνακας 80. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της απόλυτης υγρασίας του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 7-9/5/13.

Σύμφωνα με τα παραπάνω την πρώτη ημέρα με την μεγαλύτερη ηλιοφάνεια το Clear φαίνεται να έχει την μεγαλύτερη απόλυτη υγρασία ενώ ακολουθεί το Diffuse και το Double. Τις υπόλοιπες μέρες το Double εξακολουθεί να έχει την χαμηλότερη απόλυτη υγρασία κατά 10-20 % σε σχέση με τα υπόλοιπα ενώ την υψηλότερη τιμή

διατηρεί το Double. Κατά την διάρκεια της νύχτας 7-8/5 δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές ενώ στην δεύτερη νύχτα 8-9/5 φαίνεται πως το Double έχει χαμηλότερη τιμή κατά 5-10%.

• 29/5/13-31/5/13



Διάγραμμα 39. Πορεία των τιμών της απόλυτης υγρασίας των θερμοκηπίων για την περίοδο 29-31/5/13.

Απόλυτη υγρασία (g/m ³)			
Πρωί (08:00 - 20:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
29/5/13	17,75±1,58	16,98±1,33	12,31±1,27
30/5/13	13,68±2,22	13,00±2,35	8,51±1,86
31/5/13	11,62±2,01	10,33±2,25	7,13±1,35

Πίνακας 81. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της απόλυτης υγρασίας του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 29-31/5/13.

Απόλυτη υγρασία (g/m ³)			
Βράδυ (20:00 - 08:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
29-30/5/13	12,90±2,08	11,91±1,61	10,38±0,73
30-31/5/13	9,60±1,23	9,07±1,57	7,06±0,70

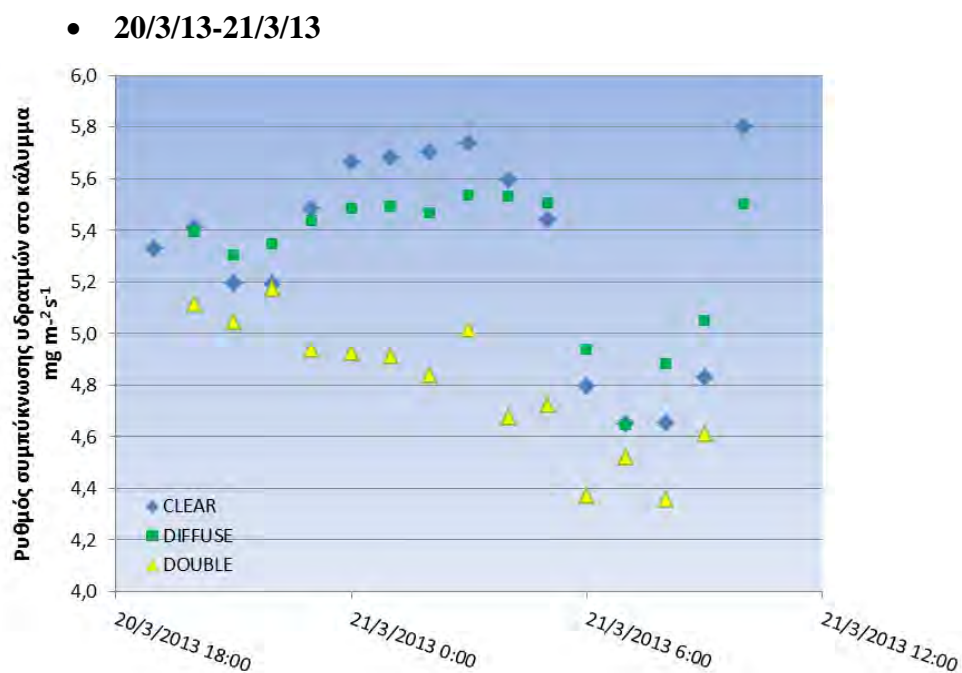
Πίνακας 82. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της απόλυτης υγρασίας του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια της νύχτας για την περίοδο 29-31/5/13.

Κατά την διάρκεια της μέρας οι μεταχειρίσεις Clear και Diffuse δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ενώ το Double έχει χαμηλότερη απόλυτη υγρασία κατά 25-35% σε σχέση με τα υπόλοιπα. Κατά την διάρκεια της νύχτας το Double διατηρεί χαμηλότερη απόλυτη υγρασία κατά 18% από το Clear και κατά 10% από το Diffuse. Επίσης το Diffuse έχει χαμηλότερη απόλυτη υγρασία κατά 5-7% σε σχέση με τον Clear.

4.4.3 Συμπύκνωση υδρατμών στο κάλυμμα οροφής

Παράλληλα με την απόλυτη υγρασία υπολογίστηκε και η απόλυτη υγρασία της επιφάνειας του καλύμματος στον κορεσμό η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία του καλύμματος. Μόνο όταν η απόλυτη υγρασία του αέρα είναι μεγαλύτερη από την απόλυτη υγρασία του καλύμματος στον κορεσμό έχουμε συμπύκνωση υδρατμών πάνω στο κάλυμμα.

Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα όσον αφορά τον ρυθμό συμπύκνωσης των υδρατμών πάνω στο κάλυμμα οροφής και αφορούν τις ώρες της ημέρας όπου η απόλυτη υγρασία του αέρα είναι μεγαλύτερη από την απόλυτη υγρασία του καλύμματος στον κορεσμό, ή αλλιώς όταν η θερμοκρασία του καλύμματος πέφτει κάτω από το σημείο δρόσου.



Διάγραμμα 40. Πορεία των τιμών συμπύκνωσης υδρατμών στο κάλυμμα της οροφής των θερμοκηπίων για την περίοδο 20-21/3/13.

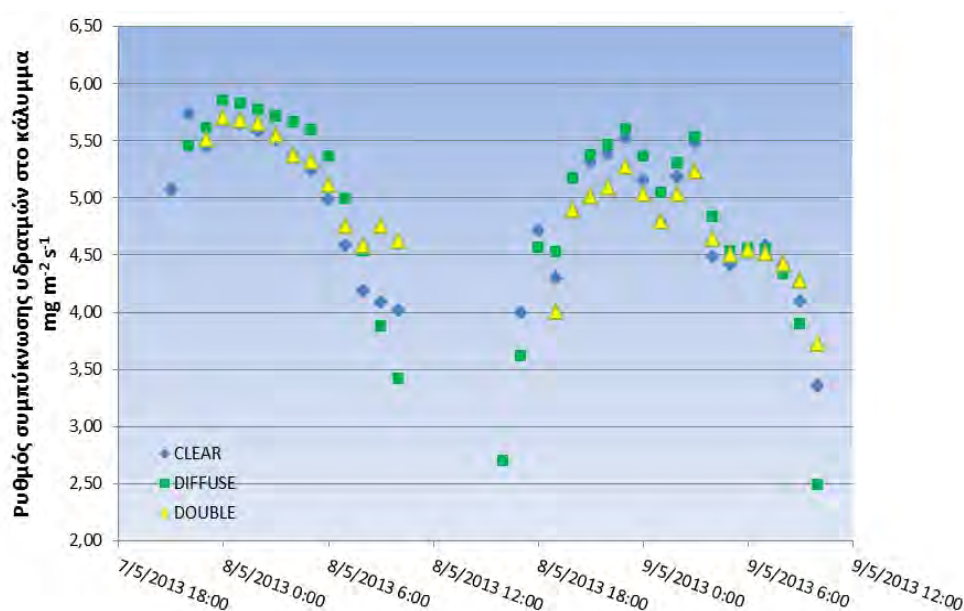
Συμπύκνωση υδρατμών ($\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
18:00-10:00			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
20-21/3/13	5,32±0,40	5,30±0,28	4,80±0,26

Πίνακας 83. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της συμπύκνωσης των υδρατμών στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος οροφής για την περίοδο 20-21/3/13.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε πως στο Double ο ρυθμός συμπύκνωσης των υδρατμών στο κάλυμμα οροφής είναι 10 % μικρότερος σε σχέση με τα υπόλοιπα για την περίοδο της νύχτας από 20/3/13 18:00 μέχρι 21/3/13 10:00.

Επίσης η υγροποίηση πάνω στο διπλό κάλυμμα αρχίζει μία ώρα αργότερα (19:00) και σταματάει μια ώρα νωρίτερα (09:00) σε σχέση με τα υπόλοιπα, συνεπώς η συνολική υγροποίηση στο κάλυμμα θα είναι μικρότερη.

• 7/5/13-9/5/13



Διάγραμμα 41. Πορεία των τιμών συμπύκνωσης υδρατμών στο κάλυμμα της οροφής των θερμοκηπίων για την περίοδο 7-9/5/13.

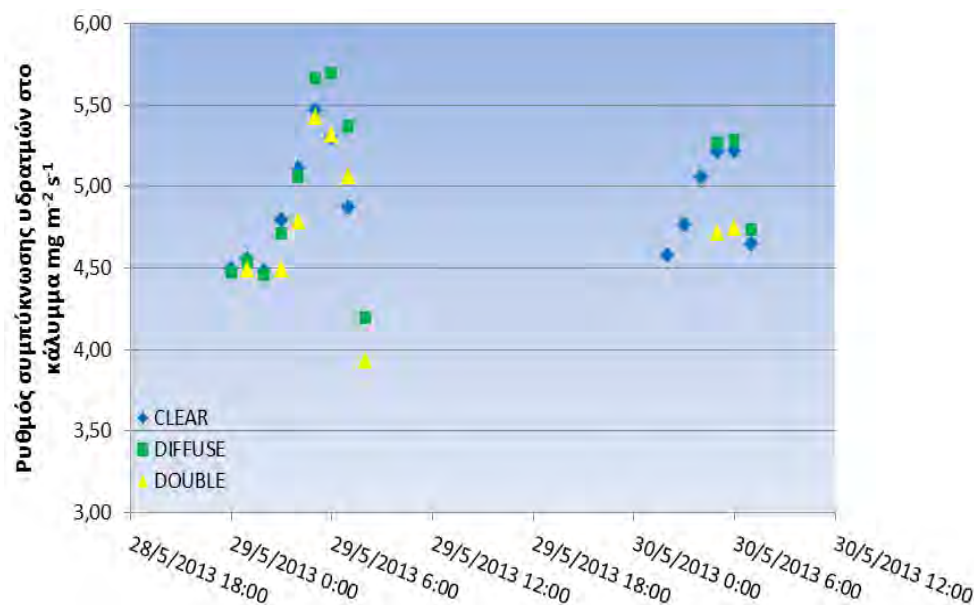
Συμπύκνωση υδρατμών ($\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
(16:00 - 10:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
7-8/5/13	$5,08 \pm 0,62$	$5,35 \pm 1,26$	$5,22 \pm 0,43$
8-9/5/13	$4,72 \pm 0,59$	$4,98 \pm 0,90$	$4,69 \pm 0,44$

Πίνακας 84. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της απόλυτης υγρασίας του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 7-9/5/13.

Σύμφωνα με τα παραπάνω παρατηρούμε πως και για τις δύο ημέρες που επιλέχθηκαν, ο ρυθμός συμπύκνωσης των υδρατμών και για τις τρεις μεταχειρίσεις δεν έχει μεγάλες διαφορές, με την διαφορά πως στα Diffuse και Clear η υγροποίηση στο κάλυμμα οροφής αρχίζει 3 ώρες νωρίτερα και τελειώνει 1 ώρα αργότερα, πράγμα

που σημαίνει πως ο συνολικός όγκος της συμπύκνωσης των υδρατμών είναι μεγαλύτερος σε σχέση με το Double.

• 29/5/13-31/5/13



Διάγραμμα 42. Πορεία των τιμών συμπύκνωσης υδρατμών στο κάλυμμα της οροφής των θερμοκηπίων για την περίοδο 29-31/5/13.

Συμπύκνωση υδρατμών ($\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
(00:00 - 10:00)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
29-30/5/13	$4,59 \pm 0,94$	$4,90 \pm 0,56$	$4,79 \pm 0,53$
30-31/5/13	$4,91 \pm 0,29$	$5,10 \pm 0,31$	$4,73 \pm 0,02$

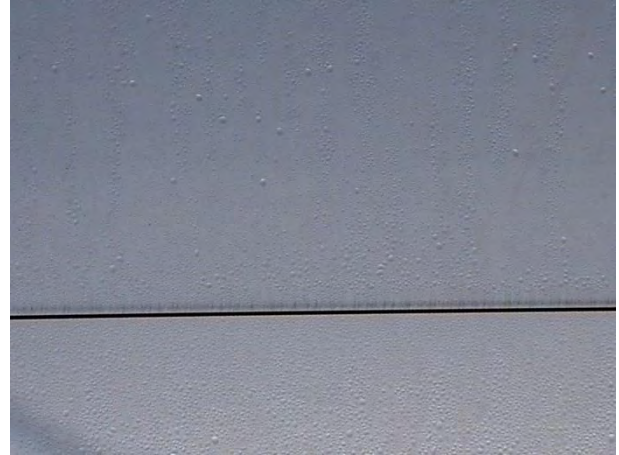
Πίνακας 85. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις της απόλυτης υγρασίας του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια της μέρας για την περίοδο 29-31/5/13.

Σύμφωνα με τα παραπάνω ο ρυθμός συμπύκνωσης για τα τρία θερμοκήπια δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές αλλά η υγραποίηση πάνω στο κάλυμμα του Double συμβαίνει για λιγότερες ώρες κατά την διάρκεια της νύχτας σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες του καλύμματος οροφής των τριών θερμοκηπίων όπου φαίνεται η πυκνότητα των σταγόνων λόγω συμπύκνωσης στην εσωτερική πλευρά των καλυμμάτων. Οι φωτογραφίες τραβήχτηκαν στις 30/10/13 και ώρα 10:00 πμ.



Εικόνα 14. Η εσωτερική πλευρά του καλύμματος *Clear*.



Εικόνα 15. Η εσωτερική πλευρά του καλύμματος *Diffuse*.

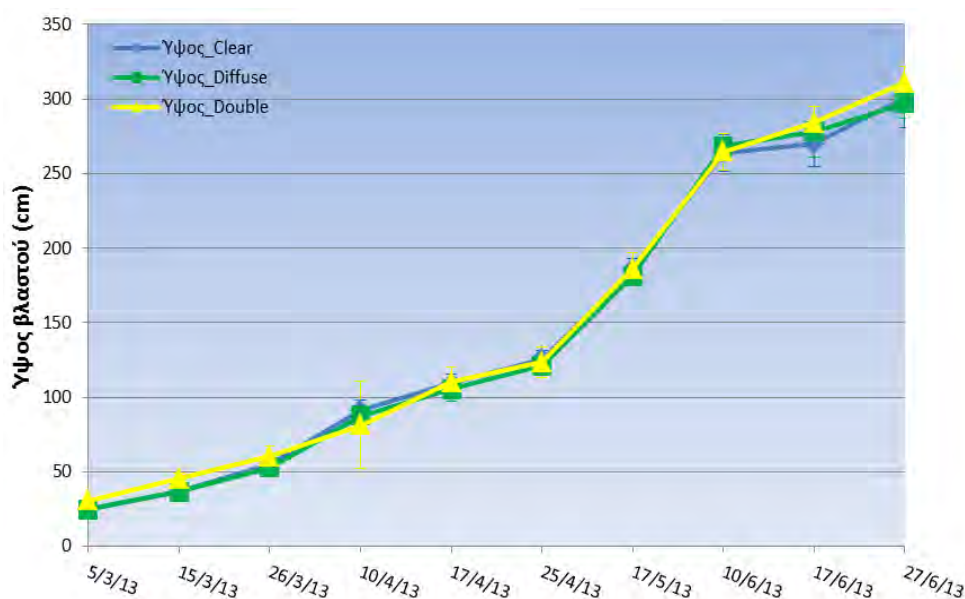


Εικόνα 16. Η εσωτερική πλευρά του καλύμματος *Double*.

4.5 Αγρονομικές μετρήσεις (μη καταστροφικές)

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αγρονομικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας στη εξέλιξή τους στο χρόνο. Το ύψος των φυτών, ο αριθμός των ανθοταξιών και η φυλλική επιφάνεια είναι τα αγρονομικά στοιχεία που μελετήθηκαν και για τα οποία έγινε στατιστική ανάλυση.

- Ύψος



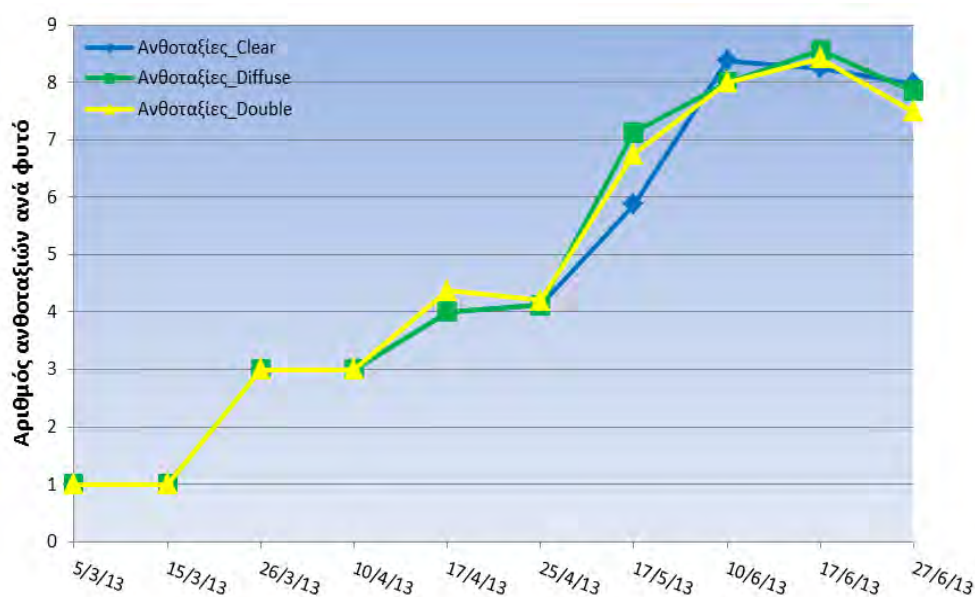
Διάγραμμα 43. Πορεία των τιμών του ύψους του βλαστού των φυτών για κάθε μεταχείριση.

Ύψος φυτών (cm)			
Ημερομηνία	Clear	Diffuse	Double
5/3/13	25,00±3,06	24,75±1,70	30,69±1,53
15/3/13	36,69±4,08	36,56±4,44	45,31±3,79
26/3/13	54,88±4,32	52,88±5,62	60,19±6,99
10/4/13	91,00±6,74	87,75±3,81	81,38±29,28
17/4/13	109,38±6,44	105,38±7,91	110,13±10,29
25/4/13	125,38±5,55	121,38±6,09	123,63±10,20
17/5/13	185,50±7,11	181,38±6,89	185,88±10,78
10/6/13	264,00±12,32	268,13±5,06	264,63±12,22
17/6/13	269,88±14,88	278,13±16,92	284,13±10,84
27/6/13	301,25±20,66	297,38±9,93	311,13±10,75

Πίνακας 86. Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις του ύψους των μετρημένων φυτών για κάθε μεταχείριση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στο ύψος των φυτών μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων με εξαίρεση μια μικρή αύξηση του ύψους των φυτών στο Double από τα μέσα Ιουνίου και μετά.

- Αριθμός ανθοταξιών

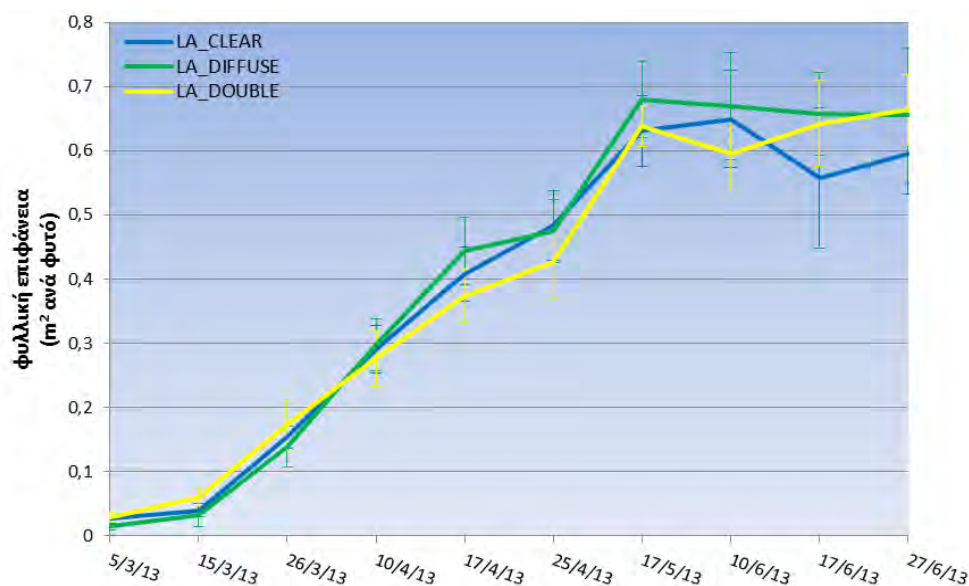


Διάγραμμα 44. Μέσοι όροι του αριθμού των ταξιανθιών ανά φυτό για κάθε μεταχείριση.

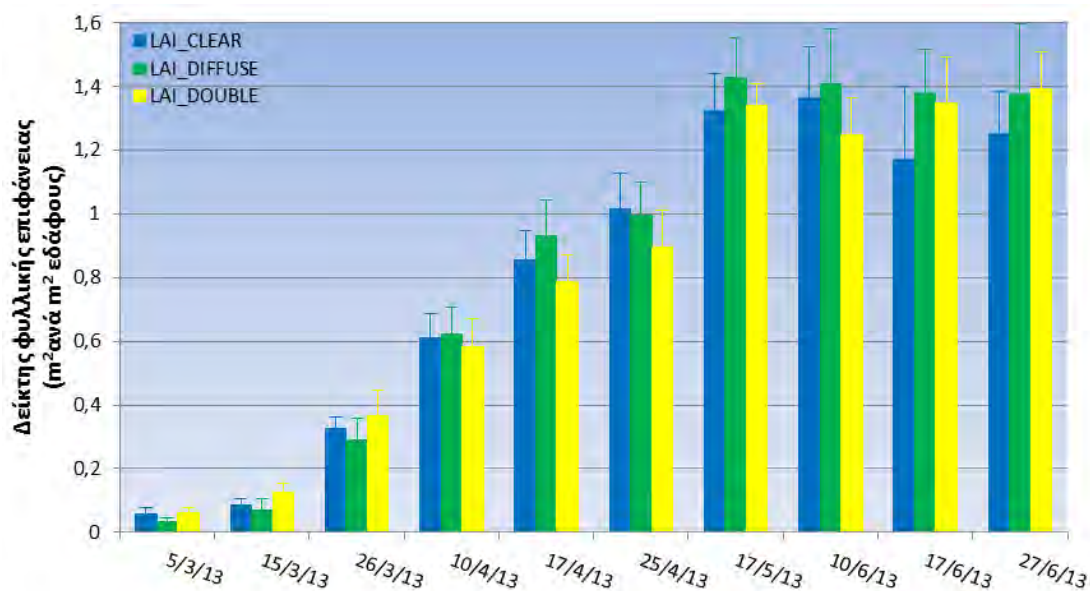
Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως μέχρι τα τέλη Μαρτίου δεν υπήρχαν διαφορές στον αριθμό των ταξιανθιών, ενώ κατά την διάρκεια του Μαΐου φαίνεται πως τα φυτά στα θερμοκήπια Double και Diffuse έχουν περισσότερες ανθοταξίες σε σχέση με το Clear κυρίως λόγω των εγκαυμάτων στις νέες ανθοταξίες από την έντονη ηλιακή ακτινοβολία.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι μέσοι όροι της φυλλικής επιφάνειας ανά φυτό για κάθε μεταχείριση ($\text{m}^2/\text{φυτό}$), καθώς και ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (m^2/m^2 εδάφους) στην εξέλιξή τους στο χρόνο.

- **Φυλλική επιφάνεια**



Διάγραμμα 45. Πορεία της φυλλικής επιφάνειας (m^2 ανά φυτό) για κάθε μεταχείριση.



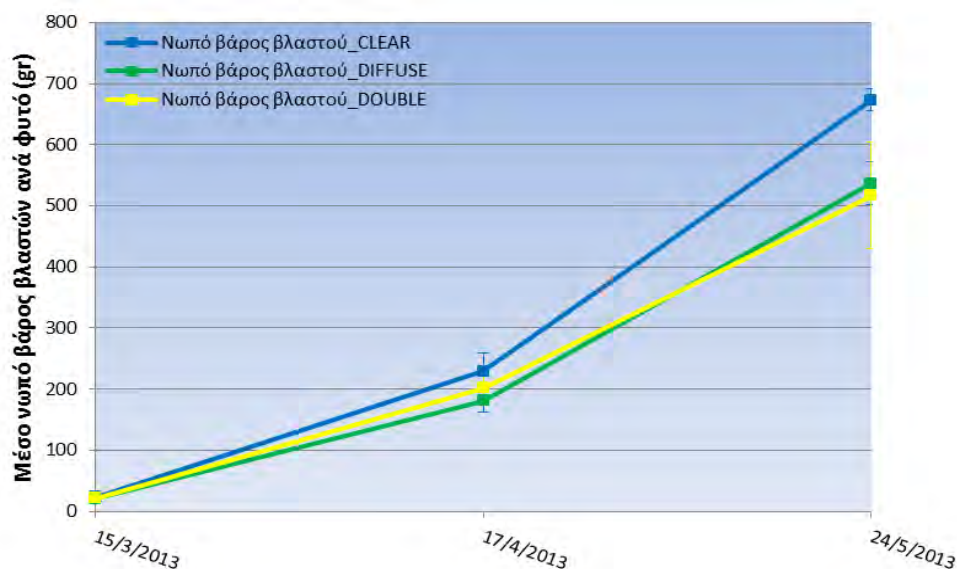
Διάγραμμα 46. Πορεία του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (m^2 ανά m^2 εδάφους) για κάθε μεταχείριση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφορές στην φυλλική επιφάνεια μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων με εξαίρεση μια μικρή υπεροχή του Diffuse από τα μέσα Απριλίου και μετά σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Σύμφωνα με το κριτήριο LSD αλλά και με την μέθοδο Repeated Measures δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων όσον αφορά το ύψος των φυτών, των αριθμό των ταξιανθιών και την φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας.

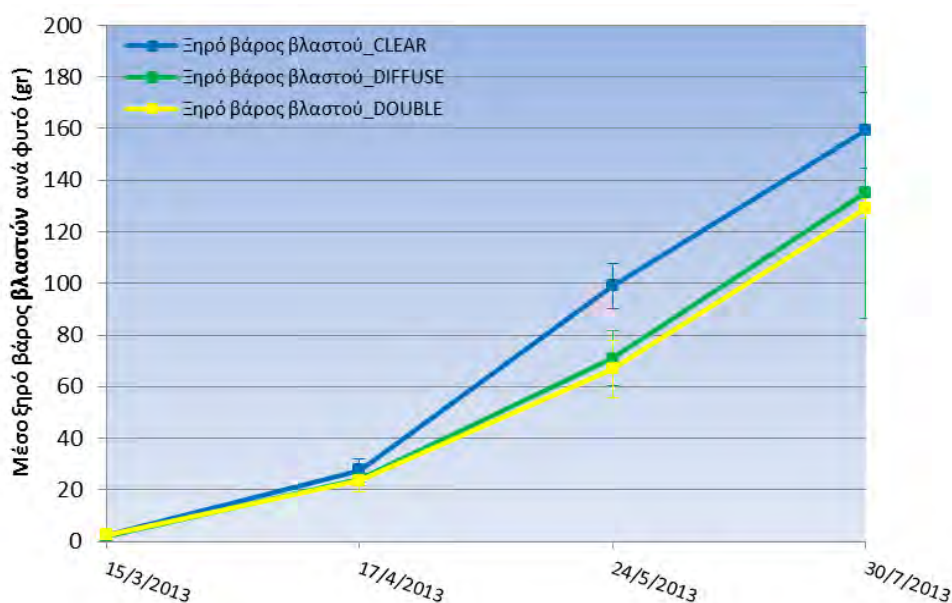
4.6 Αγρονομικές μετρήσεις (καταστροφικές)

Στο διάγραμμα 47 παρουσιάζεται η πορεία των μέσων τιμών του νωπού βάρους των βλαστών, για τα φυτά στα οποία έγιναν οι καταστροφικές μετρήσεις κατά την διάρκεια του πειράματος.



Διάγραμμα 47. Πορεία του μέσου νωπού βάρους των βλαστών ανά φυτό για κάθε μεταχείριση.

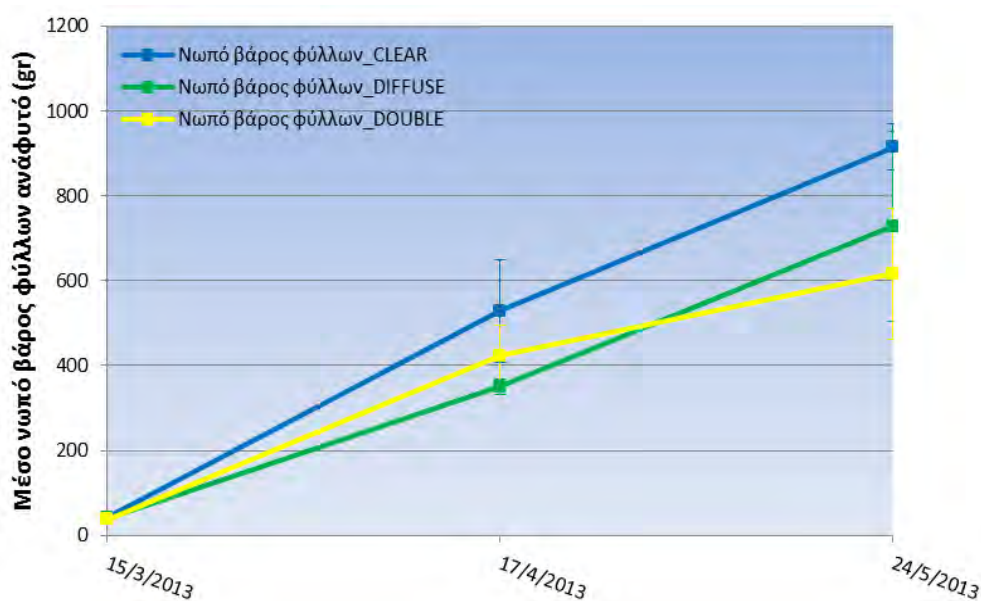
Στο διάγραμμα 48 απεικονίζεται η πορεία των μέσων τιμών του ξηρού βάρους των βλαστών, για τα φυτά στα οποία έγιναν οι καταστροφικές μετρήσεις κατά την διάρκεια του πειράματος. Τα φυτά της μέτρησης (30/7/2013) ζυγίστηκαν μόνο για το ξηρό βάρος των βλαστών.



Διάγραμμα 48. Πορεία του μέσου ξηρού βάρους των βλαστών ανά φυτό για κάθε μεταχείριση.

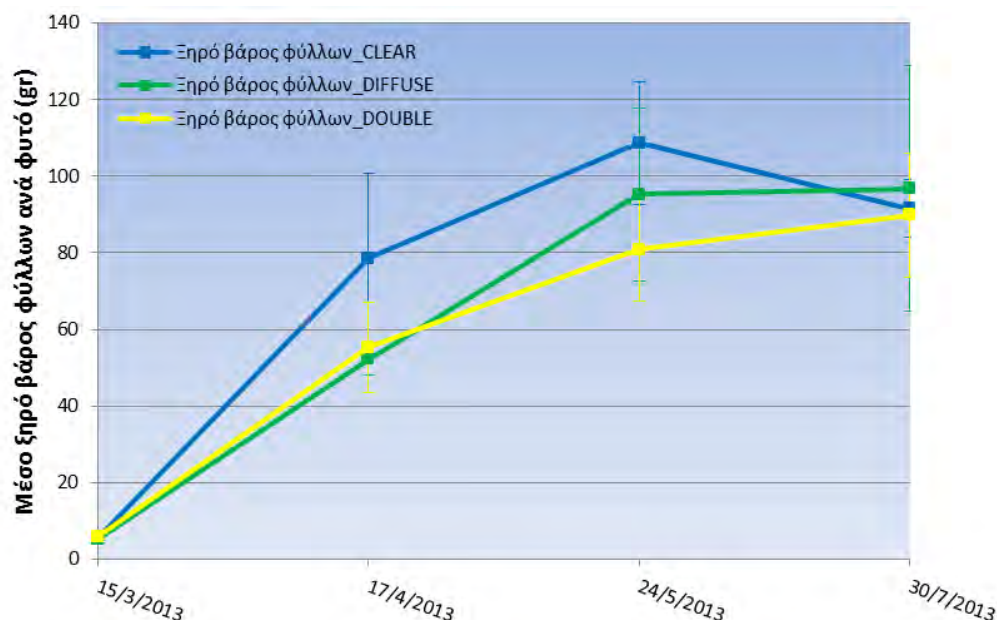
Το μέσο χλωρό και ξηρό βάρος των βλαστών των φυτών του θερμοκηπίου Clear φαίνεται να είναι υψηλότερο κατά 20-30% σε σχέση με τα υπόλοιπα από τα μέσα Μαΐου και μέχρι το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου. Μεταξύ των θερμοκηπίων Diffuse και Double δεν υπάρχουν διαφορές όσον αφορά το βάρος των βλαστών.

Στο διάγραμμα 49 παρουσιάζεται η πορεία των μέσων τιμών του νωπού βάρους των φύλλων, για τα φυτά στα οποία έγιναν οι καταστροφικές μετρήσεις κατά την διάρκεια του πειράματος



Διάγραμμα 49. Πορεία του μέσου νωπού βάρους των φύλλων ανά φυτό για κάθε μεταχείριση.

Στο διάγραμμα 50 απεικονίζεται η πορεία των τιμών του μέσου ξηρού βάρους των φύλλων για τις τρεις μεταχειρίσεις του πειράματος. Όπως και στην περίπτωση του ξηρού βάρους των βλαστών, τα φυτά της μέτρησης (30/7/2013) ζυγίστηκαν μόνο για το ξηρό βάρος των φύλλων.



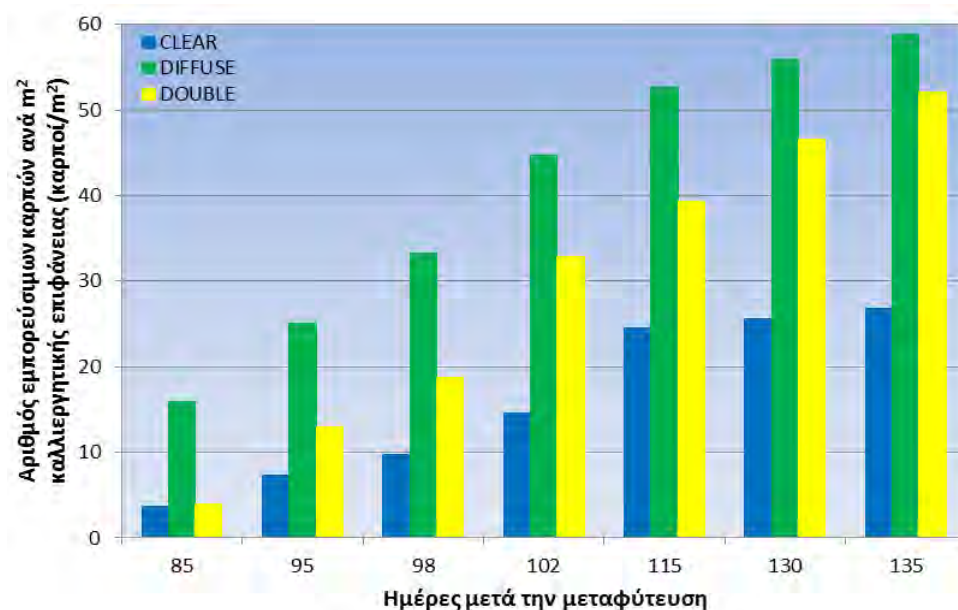
Διάγραμμα 50. Πορεία του μέσου ξηρού βάρους των φύλλων ανά φυτό για κάθε μεταχείριση.

Το μέσο χλωρό βάρος των φύλλων της καλλιέργειας του θερμοκηπίου Clear φαίνεται να είναι υψηλότερο κατά 30-35% σε σύγκριση με τα υπόλοιπα από τα μέσα Απριλίου και μέχρι την τελευταία μέτρηση που έγινε στις 24/5/13. Το μέσο ξηρό βάρος των φύλλων της καλλιέργειας στο Clear είναι επίσης υψηλότερο κατά 30-35% από τα μέσα Απριλίου μέχρι και τα μέσα Ιουνίου.

4.7 Απόδοση της καλλιέργειας

- Εαρινή καλλιέργεια

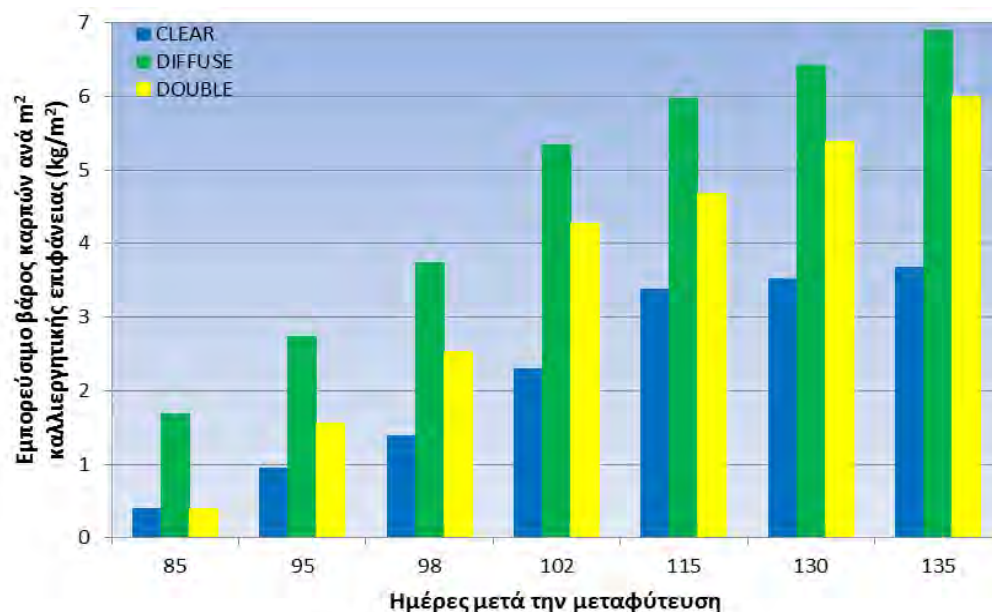
Στο διάγραμμα 51 παρουσιάζεται η εξέλιξη του αριθμού των εμπορεύσιμων καρπών (καρποί/m²) αθροιστικά κατά την διάρκεια της εαρινής καλλιέργειας.



Διάγραμμα 51. Αριθμός των εμπορεύσιμων καρπών (αθροιστικά) για κάθε μεταχείριση κατά την διάρκεια της εαρινής καλλιέργειας.

Όσον αφορά τον αριθμό των εμπορεύσιμων καρπών (διάγραμμα 51), διαπιστώνουμε πώς το θερμοκήπιο Clear είχε συνολικά 54 και 48% λιγότερους καρπούς σε σχέση με το θερμοκήπιο Diffuse και Double αντίστοιχα. Η μεγαλύτερη διαφορά στον αριθμό των εμπορεύσιμων καρπών μεταξύ του Clear και των υπολοίπων παρατηρείται από την 102^η ημέρα μετά την μεταφύτευση και μέχρι το τέλος της καλλιέργειας. Επίσης, το Diffuse είχε 11% περισσότερους εμπορεύσιμους καρπούς σε σχέση με το Double.

Στο διάγραμμα 52 παρουσιάζεται η εξέλιξη του βάρους των εμπορεύσιμων καρπών (kg/m^2) αθροιστικά, για την εαρινή καλλιέργεια.



Διάγραμμα 52. Εμπορεύσιμη παραγωγή (αθροιστικά) ανά καλλιεργητική επιφάνεια για κάθε μεταχείριση κατά την διάρκεια της εαρινής καλλιέργειας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το θερμοκήπιο Diffuse είχε 45% μεγαλύτερη απόδοση σε εμπορεύσιμους καρπούς από το Clear και 11,5% από το Double. Επίσης, το Double είχε 38,5% μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με το Clear.

Συγκεκριμένα το θερμοκήπιο Diffuse είχε συνολική απόδοση $6,9 \text{ kg/m}^2$, το Double 6 kg/m^2 , και το Clear $3,7 \text{ kg/m}^2$.

Οι συνολικοί καρποί που μαζεύονταν από κάθε θερμοκήπιο ήταν περισσότεροι σε σχέση με τους καταμετρημένους εμπορεύσιμους καρπούς. Και τα τρία θερμοκήπια είχαν αρκετούς καρπούς με ξηρή σήψη κορυφής (τάπα) αλλά με πολύ πιο έντονο το φαινόμενο στο θερμοκήπιο Clear όπου και αφήνονταν λιγότεροι καρποί ανά ανθοταξία για να ωριμάσουν (περίπου 3- 4 καρποί ανά ανθοταξία). Στα υπόλοιπα θερμοκήπια αφήνονταν 5-6 καρποί για ωρίμανση ανά ανθοταξία. Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται τα έντονα συμπτώματα της φυσιολογικής ανωμαλίας blossom end rot (ξηρή σήψη κορυφής) στους καρπούς των φυτών του θερμοκηπίου Clear.



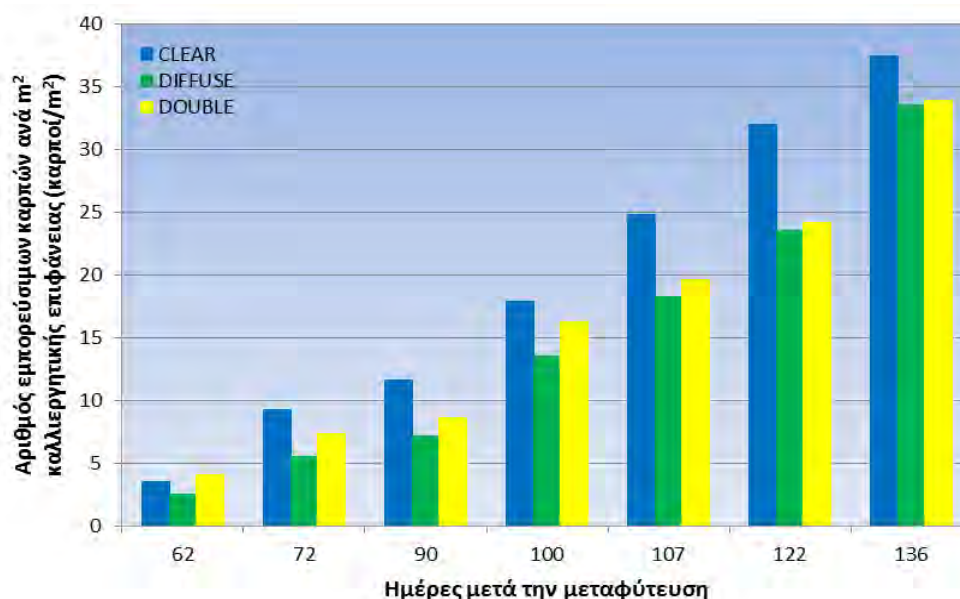
Εικόνα 17. Ξηρή σήψη κορυφής σε καρπό τομάτας στο θερμοκήπιο Clear στις 30/4/2013.



Εικόνα 18. Καρποί με ξηρή σήψη κορυφής στο θερμοκήπιο Clear στις 30/4/2013.

- Χειμερινή καλλιέργεια

Στο διάγραμμα 53 παρουσιάζεται η εξέλιξη του αριθμού των εμπορεύσιμων καρπών (καρποί/m²) αθροιστικά κατά την διάρκεια της χειμερινής καλλιέργειας.



Διάγραμμα 53. Αριθμός των εμπορεύσιμων καρπών (αθροιστικά) για κάθε μεταχείριση κατά την διάρκεια της χειμερινής καλλιέργειας.

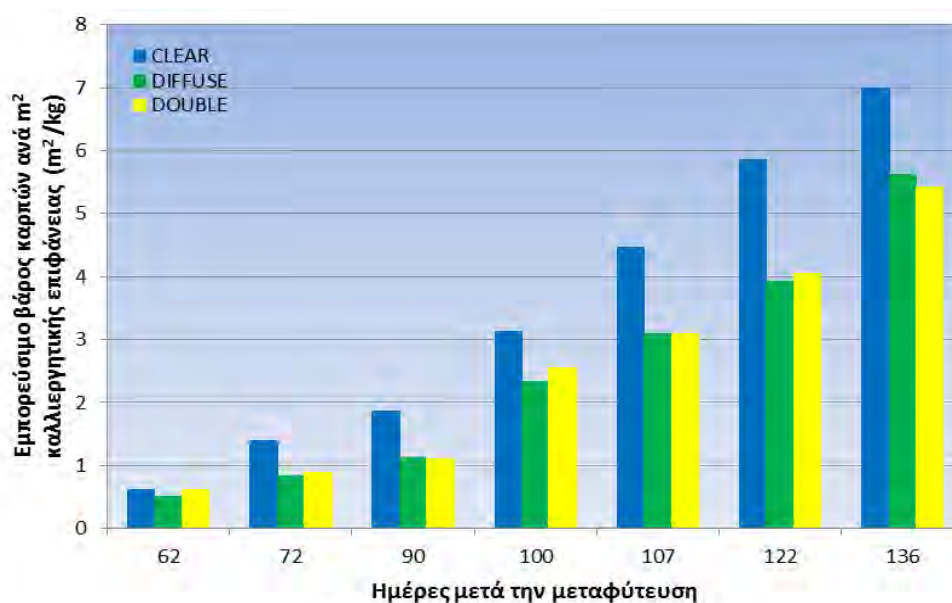
Παρατηρούμε πώς στο θερμοκήπιο Clear είχαμε περισσότερους καρπούς κατά 10% σε σχέση με τα θερμοκήπια Diffuse και Double. Μεταξύ των θερμοκηπίων Double και Diffuse δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές όσον αφορά το σύνολο των καρπών. Μολονότι ο συνολικός αριθμός των καρπών και για τις τρεις μεταχειρίσεις είναι μικρότερος σε σχέση με αυτόν της εαρινής καλλιέργειας, ο μέσος όρος βάρους ανά καρπό (gr/καρπό) είναι μεγαλύτερος για την χειμερινή καλλιέργεια.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μέσοι όροι του βάρους των καρπών για κάθε μεταχείριση.

Καλλιέργεια	Μέσο βάρος καρπού (gr/καρπό)		
	Clear	Diffuse	Double
Εαρινή	147,56±44,81	127,68±34,01	139,97±49,94
Χειμερινή	193,02±52,96	174,56±42,66	176,19±63,87

Πίνακας 87. Μέσο βάρος καρπού των τριών μεταχειρίσεων και για τις δύο καλλιεργητικές περιόδους.

Στο διάγραμμα 54 παρουσιάζεται η αθροιστική παραγωγή των εμπορεύσιμων καρπών (καρποί/m²) της καλλιέργειας κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου.



Διάγραμμα 54. Εμπορεύσιμη παραγωγή (αθροιστικά) ανά καλλιεργητική επιφάνεια για κάθε μεταχείριση κατά την διάρκεια της χειμερινής καλλιέργειας.

Παρατηρούμε από τα παραπάνω πώς η συνολική παραγωγή στο θερμοκήπιο Clear ήταν υψηλότερη κατά 22 και 20% σε σχέση με το Double και το Diffuse αντίστοιχα. Μεταξύ των Diffuse και Double δεν υπήρξαν μεγάλες διαφορές. Η συνολική απόδοση για το Clear ήταν 7 kg/m², για το Diffuse 5,61 kg/m² και για το Double 5,42 kg/m².

5 Συζήτηση και Συμπεράσματα

5.1 Κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από τις μετρήσεις της ενεργειακής αξιολόγησης για τις τρεις μεταχειρίσεις, επαληθεύεται η άποψη πως υπάρχει ενεργειακό όφελος με την χρήση ενός διπλού πλαστικού καλύμματος έναντι ενός απλού. (Garzoli και Blackwell, 1987; Seginer et al, 1988; Abak et al, 1994; Zhang et al, 1996; Gupta και Chandra, 2002; Cemek et al 2006;) Το διπλό πλαστικό κάλυμμα εξαιτίας της μόνωσης που προσφέρει στην οροφή του θερμοκηπίου έχει μικρότερο συντελεστή θερμοπερατότητας ($U \approx 3,5 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$) σε σχέση με το Clear ($U \approx 7 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$) με αποτέλεσμα να μειώνονται οι απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας από το κάλυμμα. Πιο συγκεκριμένα το θερμοκήπιο Clear κατανάλωνε λιγότερη ενέργεια σε σχέση με το Double, με τον μέσο όρο να κυμαίνεται στο 40%. Το Clear ήταν επίσης πιο ενεργοβόρο και σε σχέση με το θερμοκήπιο Diffuse ($U \approx 5,5 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$) με τον μέσο όρο να κυμαίνεται στο 11%. Οι Dueck et al (2012) συμφωνούν ότι σε θερμοκήπιο με κάλυψη από γυαλί με ικανότητα διάχυσης του φωτός δεν απαιτείται περισσότερη ενέργεια για θέρμανση σε σχέση με ένα απλό διαφανές γυαλί. Πέραν από το ενεργειακό όφελος που έχει το Double λόγω συναγωγής από το κάλυμμα, βρέθηκε πως τα θερμοκήπια Double και Diffuse είχαν μικρότερη περατότητα στην μεγάλου μήκους θερμική ακτινοβολία κατά την διάρκεια της νύχτας σε σχέση με το Clear. Μολονότι υπήρχε συμπίκνωση και στα τρία θερμοκήπια τις βραδινές ώρες, το κάλυμμα στο θερμοκήπιο Diffuse παρέμενε για περισσότερη ώρα στην υγρή φάση (μη αντισταγονικές ιδιότητες) με αποτέλεσμα να είναι λιγότερο περατό στην θερμική ακτινοβολία σε σχέση με το Clear. Πιο συγκεκριμένα το θερμοκήπιο Clear έχανε $30\text{-}60 \text{ W/m}^2$ καθαρής ακτινοβολίας περισσότερα σε σχέση με τα υπόλοιπα με αποτέλεσμα να ψύχεται πιο γρήγορα και να χρειάζεται μεγαλύτερα ποσά ενέργειας για να διατηρηθεί η θερμοκρασία στο επιθυμητό επίπεδο.

Σε ένα θερμοκήπιο 10000 m^2 με απλό πλαστικό κάλυμμα, στην περιοχή του Βελεστίνου, για να διατηρηθεί η θερμοκρασία στους 12°C θα πρέπει να καταναλωθούν 16000 MJ/ημέρα περισσότερα σε σχέση με ένα αντίστοιχο θερμοκήπιο με διπλό κάλυμμα. Αυτό το ποσό ενέργειας μεταφράζεται σε εξοικονόμηση 500 €/ημέρα (για καυστήρα πετρελαίου) για έναν παραγωγό για την χειμερινή περίοδο.

5.2 Το μικροκλίμα σε σχέση με την καλλιέργεια

Κατά την διάρκεια του πειράματος, από τις 15/2/13 μέχρι τις 15/7/13 καταγράφονταν οι μετρήσεις όλων των παραμέτρων που καθορίζουν το μικροκλίμα του θερμοκηπίου. Οι σημαντικότερες από αυτές ήταν η ηλιακή ακτινοβολία, η καθαρή ακτινοβολία, η θερμοκρασία αέρα και η θερμοκρασία της καλλιέργειας, η σχετική υγρασία, το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών και η συμπύκνωση στο κάλυμμα.

Για την περίοδο από την μεταφύτευση (15/2/13) μέχρι και τα μέσα Απριλίου όπου και λειτουργούσε το σύστημα της θέρμανσης δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στην θερμοκρασία αέρα κατά την διάρκεια της νύχτας ενώ τις πρωινές ώρες το Diffuse διατηρεί 1°C λιγότερο από τα υπόλοιπα. Τις μεσημεριανές ώρες (11:00 - 15:00) και με ηλιόλουστο καιρό η διαφορά φτάνει μέχρι και του $2,5^{\circ}\text{C}$, κάτι που οφείλεται στο μειωμένο φορτίο ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται μέσα στο θερμοκήπιο λόγω του καλύμματος της διάχυσης. Από τα μέσα Απριλίου και μέχρι τα τέλη Ιουνίου, (όπου δεν υπήρχε συμπληρωματική θέρμανση από τους καυστήρες) τις νυχτερινές ώρες το Double ήταν $0,5-1,5^{\circ}\text{C}$ πιο ζεστό σε σχέση με τα υπόλοιπα. Τις πρωινές ώρες το Diffuse ήταν πάλι πιο δροσερό κατά 1°C ενώ η διαφορά έφτανε τους $2,5^{\circ}\text{C}$ τις μεσημεριανές ώρες. Το κάλυμμα της διάχυσης πέραν από τη ικανότητα που έχει να διαχέει το φως ομοιόμορφα για τα φυτά, μπορεί να βοηθήσει και στον δροσισμό του θερμοκηπίου τους καλοκαιρινούς μήνες, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου επικρατεί έντονη ηλιοφάνεια.

Η θερμοκρασία της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο Diffuse ήταν $0,5-1^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη τις πρωινές ώρες, σε σχέση με το Clear και το Double αντίστοιχα, κυρίως μετά το τέλος του Μαρτίου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης το γεγονός ότι τις μεσημεριανές ώρες (μετά τον Μάιο) και με υψηλή ηλιοφάνεια η διαφορά έφτανε μέχρι και τους 3°C . Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και των φύλλων της καλλιέργειας για το θερμοκήπιο της διάχυσης ήταν 3°C , για το Clear έφτανε τους $6,5^{\circ}\text{C}$ και για το Double τους $4,5^{\circ}\text{C}$. Σε αυτό συμφωνούν εν μέρει και οι Dueck et al (2012) οι οποίοι βρήκαν πώς η διαφορά θερμοκρασίας που είχε ο αέρας του θερμοκηπίου σε σχέση με τα φυτά του μάρτυρα (απλό γυαλί) έφτανε και τους 6°C ενώ δεν ξεπερνούσε τους 2°C για τα φυτά κάτω από το γυαλί της διάχυσης. Η υψηλότερη θερμοκρασία καλλιέργειας που επικρατούσε στο θερμοκήπιο Clear συνέβαλε στην μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση που υπέστησαν τα φυτά κατά την

διάρκεια του θέρους σε σχέση με τα φυτά στο Diffuse και στο Double. Κατά την διάρκεια της νύχτας η θερμοκρασία της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο Clear ήταν κατά 0,5-1,5 °C χαμηλότερη σε σχέση με τα άλλα δύο, κυρίως μετά τα μέσα Απριλίου όπου σταμάτησε και η θέρμανση. Το θερμοκήπιο Double διατηρούσε την υψηλότερη θερμοκρασία καλλιέργειας κατά την διάρκεια της νύχτας με μικρή διαφορά σε σχέση με το Diffuse. Η χαμηλότερη θερμοκρασία καλλιέργειας στο θερμοκήπιο Clear μπορεί να οφείλεται κατά ένα βαθμό στη μεγαλύτερη απώλεια σε θερμική ακτινοβολία κατά την διάρκεια της νύχτας σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Η σχετική υγρασία ημέρας στο Diffuse είναι υψηλότερη κατά 5-10% σε σχέση με το Clear και 10-20% σε σχέση με το Double, ενώ κατά την διάρκεια της νύχτας το Double είχε επίσης χαμηλότερη σχετική υγρασία κατά 5-10 % σε σχέση με τα υπόλοιπα κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες. Η χαμηλότερη σχετική υγρασία που παρατηρείται στο θερμοκήπιο Double μπορεί να οφείλεται στην χαμηλότερη διαπνοή της καλλιέργειας λόγω της χαμηλότερης περατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και στην αποβολή μέρους της υγρασίας με την συμπύκνωση των υδρατμών υπό την μορφή φιλμ νερού πάνω στο κάλυμμα. Μεταξύ του Clear και του Diffuse δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφορές. Η υψηλή σχετική υγρασία που παρατηρείται και στα τρία θερμοκήπια κυρίως μέχρι τα μέσα Μαΐου συνέβαλε στην χαμηλότερη διαπνοή των φυτών με αποτέλεσμα την εμφάνιση ξηρής σήψης κορυφής στους νεαρούς καρπούς λόγω της δυσκολίας της μετακίνησης του ασβεστίου μέσα στο φυτό. Επίσης η υψηλή υγρασία βοήθησε στην προσβολή των φυτών από ωΐδιο σε μεγαλύτερο βαθμό στα θερμοκήπια Diffuse και Clear. Ο Hand (1988) καταλήγει πως η υψηλή υγρασία είναι ο κίνδυνος ανάπτυξης μυκητολογικών ασθενειών καθώς και φυσιολογικών διαταραχών, όπως η έλλειψη ασβεστίου.

Παράλληλα με την σχετική υγρασία, υπολογίστηκε και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα το οποίο συμπεριλαμβάνει και την θερμοκρασία του αέρα, δίνοντας καλύτερη αίσθηση της υδατικής κατάστασης του χώρου. Το VPD βρέθηκε μεγαλύτερο στο θερμοκήπιο Double κατά 0,2 - 0,8 kPa σε σχέση με το Clear και κατά 0,3-1 kPa σε σχέση με το Diffuse κατά την διάρκεια της μέρας όπου και λειτουργούσε ο εξαερισμός προκειμένου να μειωθεί η θερμοκρασία. Το μικρότερο έλλειμμα κορεσμού βρέθηκε στο θερμοκήπιο Diffuse με διαφορά κατά 0,3 kPa από το Clear. Κατά την διάρκεια της νύχτας δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών εκτός από τα τέλη Μαΐου και μετά όπου το Double είχε υψηλότερο έλλειμμα κορεσμού κατά 0,3 kPa. Ο Hand (1988) παρατήρησε πως δεν υπάρχει καμία

επίδραση πάνω στη φυσιολογία ή την ανάπτυξη των λαχανικών και των καλλωπιστικών φυτών που καλλιεργούνται μέσα σε θερμοκήπια όταν το έλλειμμα κορεσμού είναι μεταξύ 0.3 και 1kPa. Αντιθέτως οι Hoffman (1979) και Bakker (1990) βρήκαν πως αρκετές καλλιέργειες επηρεάζονται αρνητικά όταν το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών παίρνει τιμές άνω του 1 kPa.

5.3 Οι οπτικές ιδιότητες των καλυμμάτων σε σχέση με την καλλιέργεια

Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία τις ηλιόλουστες ημέρες ήταν υψηλότερη μέχρι και 30% στο θερμοκήπιο Clear σε σχέση με το Diffuse και κατά 20% σε σχέση με το Double. Αυτό το ποσοστό ελαττώνεται τις ημέρες με χαμηλότερη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ενώ σε πλήρως νεφοσκεπής ημέρες η διαφορά είναι πολύ μικρές. Το πλεόνασμα του ενεργειακού φορτίου που είχε το Clear ευθύνεται για την μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα κυρίως σε σχέση με το Diffuse το οποίο είχε την χαμηλότερη περατότητα. Το Clear είχε επίσης την μεγαλύτερη περατότητα σε όλα τα φάσματα από 400-1100 nm κατά 20-25% σε σχέση με το Diffuse και κατά 10-15 % σε σχέση με το Double. Στο φάσμα της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR 400-700 nm) το Diffuse αν και υστερούσε κατά 20% σε σχέση με το Clear δεν μείωσε την φωτοσυνθετική του ικανότητα λόγω της καλύτερης διαχείρισης του διάχυτου φωτός από τα φυτά. Τα φυτά στο θερμοκήπιο της διάχυσης είχαν τον μεγαλύτερο δείκτη φυλλικής επιφάνειας ($LAI=1,4$) καθώς και την μεγαλύτερη απόδοση σε καρπούς ($6,9 \text{ kg/m}^2$). Οι Elings et al., (2012) βρήκαν πως ο ρυθμός καθαρής φωτοσύνθεσης φυτών τομάτας ήταν υψηλότερος για την περίπτωση της διάχυσης σε σχέση με τα φυτά που αναπτύσσονταν κάτω από απλό γυαλί. Επίσης βρήκαν πως η παραγωγή καρπών τομάτας αυξήθηκε κατά 8-11%. Ακόμη οι Hemming et al., (2008 a) απέδειξαν πως σε φυτά αγγουριού, το διάχυτο φως αξιοποιείται πιο αποδοτικά σε σχέση με το άμεσο φως ενώ η απόδοση σε καρπούς ήταν αυξημένη κατά 8%. Ακόμη λόγω του μειωμένου άμεσου φωτός στο θερμοκήπιο Diffuse (35%) υπήρχαν λιγότερα εγκαύματα σε νεαρά φύλλα και άνθη σε σχέση με το Clear στο οποίο το άμεσο φως αποτελούσε το 65%. Σε παρόμοια αποτελέσματα καταλήγουν και οι Kempkes et al (2012) για φυτά τριανταφυλλιάς.

Το κλάσμα του άμεσου/διάχυτου φωτός ήταν μεγαλύτερο στο θερμοκήπιο Diffuse ενώ ακολουθούσε το Double με ικανότητα διάχυσης του φωτός κατά 65% και μικρότερη διαπερατότητα κατά 10-15% σε όλα τα φάσματα. Απώλεια της τάξης του

5-20% στο ορατό φώς ή στο φάσμα της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR), στα θερμοκήπια με διπλό πλαστικό, έχει βρεθεί από αρκετούς ερευνητές (Blom and Ingratta, 1985; Bauerle, 1981). Παρά το γεγονός ότι το Double είχε χαμηλότερη περατότητα στο PAR, δεν μειώθηκε ο ρυθμός ανάπτυξης των φυτών και η φωτοσυνθετική τους λειτουργία, ενώ και η απόδοση σε καρπούς ήταν μεγαλύτερη (6 kg/m^2) σε σχέση με το Clear. Η υψηλότερη θερμοκρασία που επικρατούσε στο θερμοκήπιο Double αντιστάθμισε το γεγονός ότι επικρατούσε χαμηλότερη ένταση εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με το Clear. Σε παρόμοια συμπεράσματα καταλήγουν οι Cemek et al (2006). Όσον αφορά το ύψος των φυτών, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων παρότι περιμέναμε τα φυτά στο Diffuse και το Double να είναι ψηλότερα λόγω του χαμηλότερου φωτισμού.

5.4 Συμπύκνωση των υδρατμών στο κάλυμμα

Λόγω του διπλού καλύμματος στο θερμοκήπιο Double το εσωτερικό φύλλο διατηρεί υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με το εξωτερικό και γι' αυτόν τον λόγο φτάνει το σημείο δρόσου λιγότερες φορές κατά την διάρκεια του 24ώρου. Η μέση τιμή του ρυθμού συμπύκνωσης των υδρατμών πάνω στο κάλυμμα οροφής και για τα τρία θερμοκήπια κυμαίνεται στα $5 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ με την διαφορά ότι στο θερμοκήπιο Double η συμπύκνωση των υδρατμών αρχίζει αργότερα κατά 1 με 2 ώρες και σταματά νωρίτερα σε σχέση με τα υπόλοιπα θερμοκήπια. Αυτό σημαίνει πως το σύνολο των υδρατμών που υγροποιούνται πάνω στο κάλυμμα κατά την διάρκεια του 24ώρου είναι μικρότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα. Μολονότι και τα τρία θερμοκήπια είχαν συμπύκνωση στο κάλυμμα οροφής, το Diffuse κάλυμμα δεν είχε αντισταγονικές ιδιότητες με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σταγόνες οι οποίες παρέμεναν πάνω στο κάλυμμα σε αντίθεση με τα υπόλοιπα όπου το νερό κυλούσε στις άκρες υπό την μορφή φιλμ. Η παρουσία των σταγόνων πάνω στο κάλυμμα του Diffuse μολονότι ευνοούν την ανάπτυξη ασθενειών (στάξιμο πάνω στα φυτά) και δυσκολεύουν τις συνθήκες εργασίας για το προσωπικό, μπορούν να μειώσουν τις απώλειες θερμότητας κατά την διάρκεια της νύχτας λόγω χαμηλότερης περατότητας της θερμικής ακτινοβολίας από το κάλυμμα.

5.5 Αγρονομικά στοιχεία και αποδόσεις

Σύμφωνα με τις αγρονομικές μετρήσεις που πάρθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος βρέθηκε πως το ύψος των φυτών δεν είχε διαφορά μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων. Ο αριθμός των ταξιανθιών βρέθηκε να είναι ο ίδιος μέχρι τα τέλη του Μαρτίου, ενώ από εκείνο το σημείο και μετά φαίνεται να υπάρχει μια μείωση στον αριθμό των ταξιανθιών στο θερμοκήπιο Clear κυρίως λόγω των εγκαυμάτων των ανθέων από την έντονη άμεση ακτινοβολία. Αν και δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον δείκτη φυλλικής επιφάνειας μεταξύ των θερμοκηπίων, το Diffuse είχε υψηλότερο LAI σε σχέση με τα υπόλοιπα κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες. Ο LAI αποτελεί μια εκτίμηση του φωτοσυνθετικού δυναμικού μιας καλλιέργειας και της ικανότητας της για αύξηση.

Για την εαρινή καλλιέργεια τα τρία θερμοκήπια είχαν σχετικά χαμηλή απόδοση σε εμπορεύσιμους καρπούς λόγω του έντονου φαινομένου της ξηρής σήψης κορυφής, με πολύ πιο έντονο το φαινόμενο στο θερμοκήπιο Clear. Ανασταλτικά στην απόδοση της καλλιέργειας λειτούργησε και η θερμική καταπόνηση της καλλιέργειας λόγω των ακραίων τιμών θερμοκρασίας του καλοκαιριού. Οι καρποί που μετρήθηκαν στο πείραμα αφορούν μόνο τους εμπορεύσιμους καρπούς της καλλιέργειας. Συγκεκριμένα το θερμοκήπιο Diffuse είχε την υψηλότερη απόδοση ($6,9 \text{ kg/m}^2$), το Double (6 kg/m^2), και το Clear ($3,7 \text{ kg/m}^2$). Επίσης το θερμοκήπιο Diffuse είχε και τους περισσότερους καρπούς αλλά με το μικρότερο βάρος/ καρπό (124gr) ενώ το Double είχε μέσο βάρος καρπού 140gr. Αντίθετα το Clear είχε τους λιγότερους καρπούς αλλά με το μεγαλύτερο βάρος ανά καρπό (146gr).

Όσον αφορά την χειμερινή καλλιέργεια, η μεγαλύτερη απόδοση βρέθηκε στο θερμοκήπιο Clear (7 kg/m^2) ενώ ακολούθησε το Diffuse ($5,61 \text{ kg/m}^2$) και τέλος το Double ($5,42 \text{ kg/m}^2$). Λόγω της χαμηλότερης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας τον χειμώνα δεν υπήρξαν εγκαύματα στα φυτά του Clear ενώ οι καρποί με ξηρή σήψη κορυφής ήταν πολύ λιγότεροι σε σχέση με την εαρινή καλλιέργεια. Επίσης το Clear είχε τον μεγαλύτερο αριθμό καρπών σε σχέση με τα υπόλοιπα αλλά και το μεγαλύτερο βάρος ανά καρπό (193gr), όταν το Diffuse είχε μέσο βάρος καρπού 174 gr και το Double 176 gr. Τα αποτελέσματα όσον αφορά το βάρος του καρπού συμφωνούν με αυτά του Benton Jones (1999) ο οποίος αναφέρει πως το μέγεθος των καρπών μειώνεται με την μείωση της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας εξαιτίας της μειωμένης μεταφοράς φωτοσυνθετικών προϊόντων στους καρπούς. Γενικά σε

συνθήκες χαμηλού φωτισμού ευνοείται περισσότερο η βλαστική ανάπτυξη των φυτών σε βάρος της αναπαραγωγικής. Ενώ κατά την διάρκεια της εαρινής καλλιέργειας η μείωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας από το Diffuse λειτούργησε θετικά στην συνολική απόδοση της καλλιέργειας, κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου ο μειωμένος φωτισμός στο θερμοκήπιο Diffuse λειτούργησε ανασταλτικά στην απόδοση της.

5.6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση που έχει ένα διπλό πλαστικό κάλυμμα πολυαιθυλενίου (Double), ένα κάλυμμα με μεγάλη ικανότητα διάχυσης του φωτός (Diffuse) και ένα απλό κάλυμμα (Clear), στην εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση, στο μικροκλίμα, στην ανάπτυξη και την παραγωγικότητα της καλλιέργειας της τομάτας. Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση των υλικών κάλυψης στο μικροκλίμα και την καλλιέργεια μελετήθηκαν η θερμοκρασία αέρα, η σχετική υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, ο βαθμός διάχυσης του φωτός, η θερμοκρασία καλλιέργειας, η καθαρή ακτινοβολία, καθώς και η συμπύκνωση στην εσωτερική πλευρά των υλικών κάλυψης. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω:

- Όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση, βρέθηκε πως το Double λόγω των χαμηλότερων απωλειών θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία από το κάλυμμα, μπορεί να μειώσει το κόστος της θέρμανσης κατά 40% ενώ το Diffuse κατά 11% λόγω της χαμηλότερης περατότητας που έχει στην θερμική ακτινοβολία σε σχέση με το Clear.
- Το Clear λόγω της μεγάλης περατότητας που έχει στην ηλιακή ακτινοβολία είχε μεγαλύτερη ανάγκη για σκίαση και δροσισμό από τον Μάρτιο και μετά σε σχέση με το Diffuse το οποίο μείωνε την ηλιακή ακτινοβολία κατά 15-30% με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ευνοϊκότερες συνθήκες ανάπτυξης για την καλλιέργεια. Πιο συγκεκριμένα το Diffuse διατηρούσε χαμηλότερη θερμοκρασία κατά 1-2 °C από το Clear ενώ κατά την διάρκεια των μεσημεριανών ωρών η διαφορά ήταν ακόμη μεγαλύτερη. Αντίθετα, τους χειμερινούς μήνες η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας στο Diffuse δεν λειτούργησε ευνοϊκά στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου. Το γεγονός αυτό

αποτυπώθηκε και στην απόδοση σε καρπούς όπου το Clear αποδείχτηκε πιο αποδοτικό στην χειμερινή καλλιέργεια ενώ το Diffuse είχε καλύτερες αποδόσεις στην εαρινή καλλιέργεια. Το Double φαίνεται να έχει πιο σταθερή απόδοση για τις δύο περιόδους, με χαμηλότερη βέβαια απόδοση από το Clear το χειμώνα και υψηλότερη το καλοκαίρι.

- Η συμπύκνωση των υδρατμών στο κάλυμμα ήταν μεγαλύτερη στο Clear και στο Diffuse με την διαφορά ότι το Diffuse δεν είχε αντισταγονικές ιδιότητες, με αποτέλεσμα να μειώνεται ακόμη περισσότερο το εισερχόμενο φως και να ευνοείται η ανάπτυξη ασθενειών από το στάξιμο σταγόνων πάνω στα φυτά. Κατά την διάρκεια του χειμώνα όπου επικρατούσε και υψηλότερη σχετική υγρασία, η συμπύκνωση υπό μορφή σταγόνας πάνω στο κάλυμμα του Diffuse ήταν πολύ πιο έντονη με αποτέλεσμα την δημιουργία μη ευνοϊκών συνθηκών για την ανάπτυξη των φυτών.

Συνοψίζοντας, λόγω των ακραίων τιμών θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια του καλοκαιριού και τα τρία υλικά κάλυψης χρειάστηκαν συμπληρωματική σκίαση για την δημιουργία ευνοϊκών συνθηκών ανάπτυξης της καλλιέργειας. Το κάλυμμα της διάχυσης του φωτός (Diffuse) προκαλεί σκίαση και κατ' επέκταση δροσισμό του θερμοκηπίου, όμως η προσφορά του δεν είναι αρκετή χωρίς την βοήθεια συμπληρωματικής σκίασης κυρίως κατά τις μεσημεριανές ώρες. Κατά την διάρκεια του χειμώνα το φύλλο διάχυσης δεν ευνοεί το μικροκλίμα λόγω της μειωμένης διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία η οποία είναι ήδη χαμηλότερη κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών. Επίσης τα πλεονεκτήματα της διάχυσης του φωτός είναι ικανοποιητικά μόνο στην περίπτωση μεγάλης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας (Άνοιξη - Καλοκαίρι) και όχι κατά την διάρκεια του χειμώνα όπου ένα μεγάλο μέρος του φωτός έχει ήδη υποστεί σκέδαση εξαιτίας της συχνότερης παρουσίας νεφών στην ατμόσφαιρα.

Το ιδανικό φύλλο κάλυψης θα πρέπει να συνδυάζει χαμηλές απώλειες θερμότητας το χειμώνα, έντονη διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία έτσι ώστε να μεγιστοποιείται ο ρυθμός φωτοσύνθεσης των φυτών και παράλληλα να μειώνει τις ακραίες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας κατά την διάρκεια των μεσημεριανών ωρών κυρίως για τις εαρινές καλλιέργειες. Λόγω των έντονων μεταβολών του Μεσογειακού κλίματος θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα πιο ευέλικτο θερμοκήπιο έτσι ώστε να μπορεί να είναι αποδοτικό σε όλη την διάρκεια του χρόνου. Σύμφωνα με τα

παραπάνω θα μπορούσε να προταθεί το διπλό φουσκωτό κάλυμμα (Double) για υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου λόγω των χαμηλών απωλειών σε θερμότητα το χειμώνα, αλλά με την δυνατότητα συμπληρωματικής σκίασης κατά την διάρκεια της εαρινής περιόδου. Μια δεύτερη επιλογή θα μπορούσε να είναι το απλό κάλυμμα πολυαιθυλενίου (Clear), μαζί με την εγκατάσταση μετακινούμενης κουρτίνας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσαμε να έχουμε εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση το χειμώνα και μείωση της θερμικής καταπόνησης των φυτών από την έντονη ηλιακή ακτινοβολία την άνοιξη, μετακινώντας την κουρτίνα πάνω από την καλλιέργεια τις ώρες με έντονη ηλιοφάνεια.

Βιβλιογραφία

- Abak, K. A., Bascetincelik, N., Baytorun, O., Alluntas, H.H., Ozlurk, K.E., Cockshulled, Y., Tuzel, Gul. A., 1994. Influence of double plastic cover and thermal screens on greenhouse temperature, yield and quality of tomato. *Acta Horticulturae* 366, 149–54.
- Acock, B., Charles-Edwards, D.A., Hand, D.W., 1976. An analysis of some effects of humidity on photosynthesis by a tomato canopy under winter light conditions and a range of carbon dioxide concentrations. *Journal of Experimental Botany* 27, 933-941.
- Antignus, Y., Cohen, S., Mor, N., Messika, Y., Lapidot, M., 1997. The effects of UV blocking greenhouse covers on insects and insect-borne virus diseases. *Plasticulture* 112,15–20.
- ASAE., 2003. Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses. ANSI/ASAE ep 406.4. ASAE Standards, 699-707.
- Bakker, J.C., 1990. Effect of day and night humidity on yield and fruit quality of glasshouse eggplant (*Solanum melongena* L.). *Journal of Horticultural Science* 65, 747-753.
- Bakker, J.C., Welles, G.W.H., Uffelen, J.A.M. Van., 1987. The effects of day and night humidity on yield and quality of greenhouse cucumbers. *Journal of Horticultural Science* 62, 363-370.
- Bartzanas, T., Tchamitchian, M., Kittas, C., 2005. Influence of the Heating Method on Greenhouse Microclimate and Energy Consumption. *Bio systems Engineering* 91 (4), 487–499.
- Bauerle, W.L., 1981. Exolite acrylic for glazing greenhouses. *Proc. of the National Agric. Plastics Congress* 225-234.
- Benton, J.J., 1999. Tomato plant culture. CRC Press. Boca, Raton, London, New York, Washington, D.C. 18-19, 41-44.
- Blom, T.J., Ingratta, F.J., 1985. The use of polyethylene film as greenhouse glazing in North America. *Acta Horticulturae* 170, 69-80.
- Bot, G.P.A., 1983. Greenhouse climate from physical processes to a dynamic model. PhD. thesis, Waeningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands. pp 240.

- Boulard, T., Baille, H., Lagier, J., Mermier, M. Vanderschmitt, E., 1989. Water vapour transfer in a plastic house equipped with a dehumidification heat pump. *Journal of Agricultural Engineering Research* 44, 191-204.
- Boulard, T., Baille, H., Lagier, J., Mermier, M., Vanderschmitt, E., 1989. Water vapour transfer in a plastic house equipped with a dehumidification heat pump. *Journal of Agricultural Engineering Research* 44, 191–204.
- Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Gratraud, J., Elsner, B.Von., 1997. Mechanical Properties of Covering Materials for Greenhouses. Part 1, General overview. *Journal of Agricultural Engineering Research* 67, 81-96.
- Brodersen, C.R., Vogelmann, T.C., Williams, W.E., Gorton, H.L., 2008. New paradigm in leaf - level photosynthesis: direct and diffuse lights are not equal. *Plant, Cell and Environment* 31, 159-164.
- Bunce, J.A., 1984. Effects of humidity on photosynthesis. *Journal of experimental botany* 35, 1245-1251.
- Cemek, B., 2002. Effects of different covering materials on growth, development and yield of crop and environmental conditions inside greenhouses. Unpublished Ph.D. thesis, Ondokuz Mayıs University, Samsun Turkey.
- Cemek, B., Demir, Y., 2005. Testing of the condensation characteristics and light transmissions of different plastic film covering materials. *Polymer Testing* 24, 284–289.
- Cemek, B., Yusuf, D., Uzun, S., Ceyhan, V., 2006. The effects of different greenhouse covering materials on energy requirement, growth and yield of aubergine. *Energy* 31, 1780- 1788.
- Challa, H., Heuvelink, E., Meeteren, U. Van., 1995. Crop growth and development. In: *Greenhouse Climate Control-an integrated approach*. Wageningen Press pp: 62–84.
- Challa, H., Schapendonk, A.H.C.M., 1984. Quantification of effects of light reduction in greenhouses on yield. *Acta Horticulturae* 148, 501-510.
- Chandra, P., Albright, L. D., 1980. Analytical determination of the Effect on Greenhouse Heating Requirements of using night curtains. *Transactions of the ASAE* 23 (4), 994-1000.

- Chou, S.K., Chau, K.J., Ho, J.C., Ooi, C.L., 2004. On the study of an energy-efficient greenhouse for heating and dehumidification application. *Applied Energy* 77, 355–373.
- Cockshull, K.E., Graves, C.J., Carol, R.J., 1992. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science* 67(1), 11–24.
- Critten, D.L., 1990. A simplified model of light loss due to structural members in multispan greenhouse roofs. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 47, 197-205.
- Dieleman, A., Kempkes, F., 2006. Energy screens in tomato: determining the optimal opening strategy. *Acta Horticulturae* 718, 599-606.
- Dieleman, A., Meinen, E., Warmenhoven, M., Steenhuizen, J., Uenk, D., Chizhmak, S., Visser, P. De., 2007. Efficiëntie van groeilicht gedurende het etmaal Nota 490, Wageningen UR Glastuinbouw.
- Dilara, P.A., Briassoulis, D., 2000. Degradation and stabilization of low-density polyethylene films used as greenhouse covering materials, *Journal of Agricultural Engineering Research* 76, 309–321.
- Dueck, T., Janse, J., Li, T., Kempkes, F. Eveleens, B., 2012. Influence of diffuse glass on the growth and production of tomato. *Acta Horticulturae* 956, 75-82.
- Edwards, R.I., Lake, J.V., 1964. Transmission of solar radiation in a large-span east-west glasshouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 9, 245-249.
- Elings, A., Dueck, T., Meinen, E., Kempkes, F., 2012. Analysis of the Effects of Diffuse Light on Photosynthesis and Crop Production. Wageningen UR Greenhouse Horticulture. *Acta Horticulturae* 957, ISHS 2012.
- Elsner, B.Von., Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Mistriotis, A., Zabeltitz, Chr.Von., Gratraud, J., Russo, G., Suay-Cortes, R., 2000. Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries, part I: design requirements, *Journal of Agricultural Engineering Research* 75, 1–16.
- Ferare, J., Goldsberry, K.L., 1984. Environmental conditions created by plastic greenhouse covers. *Acta Horticulturae* 148, 675-682.

- García, V., Kempkes, F., Weel, P. Van., Stanghellini, P., Dueck, T., Bruins, M., 2012. Effect of a Diffuse Glass Greenhouse Cover on Rose Production and Quality. Wageningen UR Greenhouse Horticulture. *Acta Horticulturae*. 952, ISHS 2012.
- Garzoli, K., Blackwell, J., 1987. An analysis of the nocturnal heat loss from a double skin plastic greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 36, 75-85.
- Geoola, F., Kashti, Y., Levi, A., Brickman, R., 2004. Ouality evaluation of anti-drop properties of greenhouse cladding materials, *Polymer Testing* 23, 755–761.
- Geoola, F., Peiper, U.M., 1994. Outdoor testing of the condensation characteristics of plastic film covering materials using a model greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 57, 167–172.
- Ghosal, M.K., Tiwari, G.N., 2004. Mathematical modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and geothermal energy. *Solar Energy* 76, 603–613.
- Giacomell, G., Castilla, N., Henten E.J.Van., Mears, D., Sase, S., 2007. Innovation in greenhouse engineering. *Acta Horticulturae* 801, 75-88.
- Giacomelli, G.A., Roberts, W.J., 1993. Greenhouse Covering Systems. *Horticultural Technology* 3(1), 50-58.
- Gilby, G.W., 1989. Greenhouse cladding film developments. *Plastic* 81, 19-28.
- Goudriaan, J., Laar, H.H.Van., 1994. *Modelling Potential Crop Growth Processes*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Gupta, M.J., Chandra, P., 2002. Effect of greenhouse design parameters on conservation of energy for greenhouse environmental control. *Energy* 27, 777-794.
- Halleux, D., Nijskens, J., Deltour, J., Coutisse, S., Nisen, A., 1995. The effect of condensation on the heat transfers of greenhouse covering: glass or polyethylene? *Plasticulture* 66, 19–26.
- Hand, D.W., 1988. Effects of atmospheric humidity on greenhouse crops. *Acta Horticulturae* 229, 143-155.

- Hemming, S., Dueck, T., Janse, J., Noort, F.Van., 2008. The effect of diffuse light on crops. *Acta Horticulturae* 801, 1293-1300.
- Hesse, B. J., 1980. Report on Visit to Florida and California. South East Queensland Electricity Board.
- Hoffman, G.J., 1979. Humidity. In: T.W. Tibbits and T.T. Kozlowski (Editors), *Controlled Environment Guidelines for Plant Research*. Academic Press, London, 413 pp.
- Holder, R., Cockshull, K.E., 1988. The effect of humidity and nutrition on the development of calcium deficiency symptoms in tomato leaves. In: *The effects of high humidity on plant growth in energy saving greenhouses*. Commission of the European Communities, Report EUR 11261, 53-60.
- Jaffrin, A., Makhlouf, S., 1990. Mechanism of light transmission through wet polymer films. *Acta Horticulture* 281, 11–24.
- Jaffrin, A., Morisot, A., 1994. Role of structure, dirt and condensation on the light transmission of greenhouse covers. *Plasticulture* 94 (1), 33–44.
- Jaffrin, A., Urban, L., 1990. Optimization of light transmission in modern greenhouses. *Acta Horticulturae* 281, 25-33.
- Johnson, D.M., Smith, W.K., 2006. Low clouds and cloud immersion enhance photosynthesis in understory species of a southern Appalachian spruce-fir forest *American Journal of Botany* 93:1625-1632.
- Kacira, M., 2011. Greenhouse Production in US: Status, Challenges, and Opportunities. Presented at CIGR 2011 conference on Sustainable Bioproduction WEF 2011, September 19- 23, 2011 Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan.
- Kieboom, A.Van den., 1981. Light transmittance of 'alternative' greenhouse. *Acta Horticulturae* 115, 105-112.
- Kittas, C., Baile, A., 1998. Determination of the Spectral Properties of Several Greenhouse Cover Materials and Evaluation of Specific Parameters Related to Plant Response. *Journal of Agricultural Engineering Research* 71, 193 – 202.
- Kittas, C., Katsoulas. N., Baile, A., 2003. Influence of an aluminized thermal screen on greenhouse microclimate and canopy energy balance. *Transactions of ASAE* 46(6), 1653-1663.

- Kupraska, S., Slipek, Z., 2000. Optimization of Greenhouse Substrate Heating. *Journal of Agriculture Engineering Research* 76, 129-139.
- Lagier, J., 1991. Choice of flexible cladding materials in relation to greenhouse and plants growth. *Plasticulture* 90: 33-44.
- Lawlor, D.W., 1995. Photosynthesis, productivity and environment. *Journal of experimental botany* 46, 1449-1461.
- Magnani, G., 1987. Performance of different plastics films in double-clad greenhouse: four year research. *Plasticulture* 73, 9-22.
- Mahdouri, A., Baneshi, M., Gonome, H., Okajima, J., Maruyama, S., 2013. Evaluation of optical properties and thermal performances of different greenhouse covering materials. *Solar Energy* 96, 21–32.
- Markvart, J., Rosenqvist, E., Aaslyng, J.M. Ottosen, C.O., 2010. How is canopy photosynthesis and growth of *Chrysanthemums* affected by diffuse and direct light? *European Journal of Horticultural Science* 75, 253-258.
- Mulder, P. W. de Vries., 1979. Means of reducing energy consumption in the heating of greenhouses. United Nations Economic Commission for Europe. Report No 75.
- Nisen, A., Coutisse, S., 1981. Photometric properties of double wall plastics used as covering for greenhouses. *Acta Horticulturae* 115, 85-97.
- Noble, R., Holder, R., 1989. Pot plant production under various greenhouse cladding materials. *Journal of Horticultural Science* 64, 485–93.
- O’Flaherty, T., Maher, M.J., 1978. Evaluation of double-clad polyethylene greenhouses for energy saving in early tomato production. *Acta Horticulturae* 76, 335-339.
- O’Flaherty, T., Maher, M.J., 1980. Fuel consumption and crop performance in double-covered polyethylene greenhouses. *Acta Horticulturae* 107, 81-85.
- Papadakis, G., Briassoulis, D., Scarascia Mygnozza, G., Vox G., Feuilleley, P., Stoffers J.A., 2000. Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. *Journal of Agriculture Engineering Research* 77(1), 7-38.
- Papadopoulos, A.P., Hao, X., 1997. Effects of greenhouse cover materials on tomato growth, productivity, and energy use. *Science Horticulturae* 70, 165–78.

- Papadopoulos, A.P., Hao, X., 1997. Effects of greenhouse covers on seedless cucumber growth, productivity, and energy use. *Science Horticulturae* 68, 113–23.
- Papadopoulos, A.P., Hao, X., 1997. Effects of three greenhouse cover materials on tomato growth, productivity, and energy use. *Scientia Horticulturae* 70, 165-178.
- Pascale S., Maggio, A., 2004. Sustainable protected cultivation at Mediterranean climate, perspectives and challenges. *Acta Horticulturae* 691, 29-42.
- Pascale, S.De., Maggio, A., 2004. Sustainable protected cultivation at Mediterranean climate, perspectives and challenges. *Acta Horticulturae* 691, 29-42.
- Pieters, J.G., Deltour, J.M.J., 1997. Performances of Greenhouses with the Presence of Condensation on Cladding Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research* 68, 125-137.
- Pieters, J.G., Deltour, J.M.J., Debruyckere, M.J.G., 1995. Onset of condensation on the inner and outer surface of greenhouse covers during night. *Journal of Agricultural Engineering Research* 61, 165–171.
- Pieters, J.G., 1997. Interaction effects in simulating the light transmission through condensation drops on greenhouse covers, *Transactions of the ASAE* 40 (5), 1463–1465.
- Santamouris, M., Balaras, C.A., Dascalaki, E., Vallindras, M., 1994b. Passive solar agricultural greenhouses: a worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes. *Solar Energy* 53 (5), 411–426.
- Seginer, I., Kantz, D., Peiper, U., Levav, N., 1988. Transfer coefficients of several polyethylene greenhouse covers. *Journal of Agricultural Engineering Research* 39, 19-37.
- Smith, H., 1982. Light quality, photoperception, and plant strategy. *Annual Review of Plant Physiology* 33, 481–518.
- Steinbuch, F., Vooren, V., 1984. Production and quality of cut flowers and pot plants grown in greenhouses covered with energy saving double layer materials. *Acta Horticulturae* 148, 555-559.

- Stanghellini, C., de Jong, T., 1995. A model of Humidity and its application in a Greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 76, 129-148.
- Teitel, M., Tanny, J., 1998. Radiative heat transfer from heating tubes in a greenhouse. *Journal of Agriculture Engineering Research* 69, 185-188.
- Tiwari, G.N., Sharma, P.K., 1999. Off-season cultivation of cucumbers in a solar greenhouse. *Energy* 24, 151–156.
- Walker, J.N., Walton, L.R., 1971. Effect of condensation on greenhouse heat requirement. *Transactions of the ASAE* 14 (2), 282–284.
- Weimann, G., 1984. Development of energy saving greenhouse conceptions. *Acta Horticulturae* 148, 683–690.
- Winden, C.M.M.Van., Uffelen, J.A.M.Van., 1984. Comparison of the effect of single and double glass greenhouses on environmental factors and production of vegetables. *Acta Horticulturae* 148, 567-574.
- Zhang, Y., Gauthier L., de Halleux D., Dansereau B., Gosselin A., 1996. Effect of covering materials on greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology* 82, 227-244.
- Κανγά, Α., 2010. Ενεργειακή βελτιστοποίηση θερμοκηπίου με χρήση συστήματος θέρμανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία. Διδακτορική διατριβή.
- Μαυρογιαννόπουλος, Γ.Ν., 2005. Θερμοκήπια, Έκδοση ' Δ, Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε.